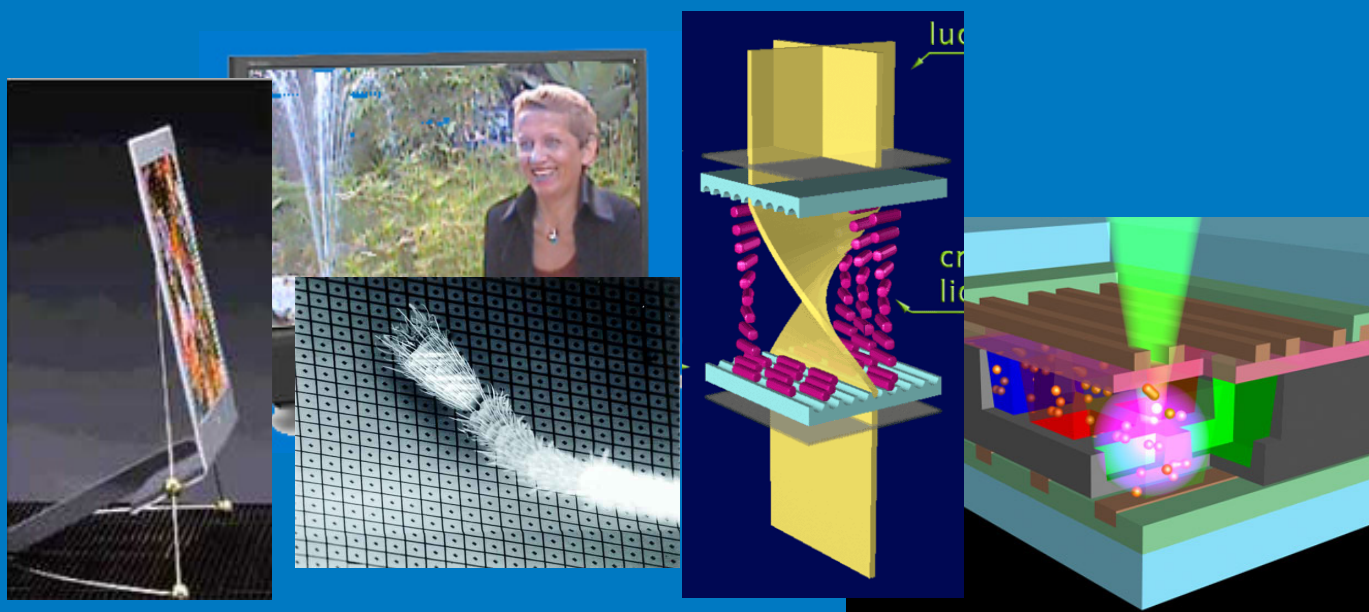
Elettronica e telecomunicazioni

Anno LI
Numero 2
Agosto 2002

Editoriale

Qualità dell'immagine percepita sugli schermi piatti

L'avvento dei display a schermo piatto potrà cambiare il modo di trasmettere la televisione digitale?

CD3-OFDM: una soluzione avanzata per i servizi DVB-T su rete isofrequenza

Che cosa è, come funziona:

Display a cristalli liquidi (LCD, DSTN, TFT)
Display al plasma (PDP, ALiS)
Proiettori a microspecchi (DMD, DLP)
OLED, una tecnologia emergente per i display

Elettronica e telecomunicazioni

Edizione ottimizzata per la stampa.
La rivista è disponibile su web
alla URL www.crit.rai.it/eletel.htm

Anno LI
N° 2
Agosto 2002

Rivista quadrimestrale a cura della Rai

Indice

Editoriale

ing. Gianfranco **Barbieri**
Direttore di
"Elettronica e
Telecomunicazioni"

L'evoluzione tecnologica verificatasi negli ultimi anni nel comparto dei prodotti consumer sta progressivamente rivoluzionando le modalità di fruizione dei servizi multimediali. In tale contesto, lo schermo, in quanto interfaccia verso l'utente, assumerà un ruolo via via più centrale nel determinare e condizionare la qualità e la tipologia dei servizi erogati. L'industria del settore sta compiendo un grande sforzo per lo sviluppo di display allo stato solido che oltre a garantire le attese prestazioni, in termini di qualità d'immagine ed ingombro ridotto, offrano altresì buone prerogative sul piano dell'affidabilità e del contenimento dei costi. Allo stato attuale dell'arte, il continuo miglioramento delle prestazioni non è ancora accompagnato da una significativa riduzione dei prezzi che renda questa nuova tecnologia competitiva, sul piano del mercato di massa, con i tradizionali tubi a raggi catodici; in previsione, tuttavia, di una progressiva penetrazione dei display allo stato solido è importante saper valutare quale potrà esserne l'impatto sulla fruizione dei nuovi servizi ed in particolare sulla produzione e diffusione dei programmi di TV digitale. Questa rivista si è già occupata dell'argomento con un paio di articoli apparsi nel numero 3 del 2000; in questo numero vengono pubblicati due articoli che approfondiscono le suddette problematiche, alla luce di una serie di indagini svolte presso il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai in collaborazione con l'UER. Tra gli argomenti esposti, emerge la considerazione che i nuovi display a schermo piatto, rispetto a quelli convenzionali, tendono ad evidenziare in misura maggiore i difetti dell'immagine e di questo occorrerà tener conto nella progettazione dei nuovi sistemi di diffusione all'utente.

Restando in tema di TV digitale, si sta procedendo in vari paesi europei a sviluppare piattaforme per l'implementazione dello standard DVB. A fronte degli inevitabili problemi che la conversione di massa dall'analogico al digitale comporta esistono svariate considerazioni che fanno ritenere tale conversione indispensabile nell'economia di un generale adeguamento dell'intero sistema radiotelevisivo alle esigenze dell'attuale panorama multimediale. Tra i vantaggi offerti dalla TV digitale occupa un posto di rilievo l'ottimizzazione della risorsa frequenze, operazione resa ancor più efficace con l'impiego, ove possibile, di reti SFN. Per poter garantire il servizio in SFN anche nelle aree più sfavorevoli, il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai ha proposto e sviluppato un sistema di equalizzazione avanzato, da integrarsi nel ricevitore DVB-T, in grado di garantire una corretta ricezione anche in aree critiche, contraddistinte dalla presenza di echi significativi al di fuori dell'intervallo di guardia; viene resa pertanto possibile la realizzazione di reti a larga copertura pur mantenendo relativamente contenuto il numero degli impianti trasmittenti. Il terzo articolo di questo numero tratta ampiamente il tema della ricezione di segnali di TV digitale in aree affette da echi e dei miglioramenti introdotti dal sistema in oggetto. Oltre ai risultati di una campagna di sperimentazione viene svolta una serie di considerazioni sull'architettura e l'implementazione del sistema proposto nei ricevitori commerciali.

Qualità dell'immagine percepita sugli schermi piatti

dr. Mario **Stroppiana**
Rai
Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica
Torino

Sommario

Questo articolo fornisce una sintesi di informazioni sui display a schermo piatto, alcune delle quali già apparse in precedenti articoli della stessa rivista, e cerca di indicare perché il possibile avvento di tali display dovrebbe interessare i broadcaster. L'articolo deve essere considerato come un'introduzione a "L'avvento dei display a schermo piatto potrà cambiare il modo di trasmettere la televisione digitale?" pubblicato su questo stesso numero.

1. Introduzione

Lo schermo a tubo a raggi catodici (CRT – Cathode Ray Tube) ha monopolizzato il mercato degli schermi televisivi sin dall'avvento della televisione. Oggigiorno tale tipo di schermo è il più venduto, ma, da qualche anno, stanno apparendo sul mercato anche altri tipi di schermi che si basano su una diversa tecnologia per la rappresentazione delle immagini. Alcuni di questi schermi, tipo quelli basati sulla tecnologia LCD (Liquid Cristal Display) a matrice attiva TFT (Thin Film Transistor), in seguito indicata solamente TFT, maggiormente diffusi come monitor di PC che come televisori, e quelli basati sulla tecnologia al plasma (PDP - Plasma Display Panel), sono schermi piatti molto sottili che possono essere appesi alla parete come quadri. Altri display come i retro proiettori sono invece caratterizzati da una notevole profondità e sono quindi ingombranti al pari dei tradizionali schermi, mentre il proiettore è poco adatto all'ambiente casalingo. Questi ultimi due tipi di schermi si basano su tecnologie di tipo TFT o DMD (Digital Micromirror Device). Una descrizione dettagliata di tali tecnologie e schermi si trova sugli articoli di bibliografia [1] e [2] apparsi sul numero 3, dicembre 2000, di Elettronica e Telecomunicazioni.

Le dimensioni degli schermi piatti dipendono dal tipo di tecnologia utilizzata; piccole e medie dimensioni per gli schermi LCD-TFT, da 15" a 25", grandi dimensioni per gli schermi basati su tecnologia al plasma (PDP) e su retro proiezione, da 40" a 60" Nota 1. Gli schermi tradizionali CRT coprono la fascia piccola ed intermedia, ossia da 14" a 38" [1].

Per quanto riguarda le caratteristiche tecniche, lo schermo TFT è leggero, ha un'alta risoluzione ed un basso consumo di potenza, mentre gli attuali schermi PDP hanno un'elevata luminosità, un elevato contrasto e grandi dimensioni.

Il costo, dipendente dalla loro superficie, è molto elevato, anche se sembra destinato a diminuire notevolmente nei prossimi anni [1].

2. Qualità audiovisiva percepita sui nuovi display

Questi nuovi tipi di schermi nascono con scansione progressiva Nota 2 e sono multi standard nel senso che accettano al loro ingresso diversi formati televisivi a definizione convenzionale (SDTV Nota 3) e ad alta definizione (HDTV Nota 4).

La televisione a definizione convenzionale prevede, nello standard europeo, 625 righe a scansione interallacciata e 50 Hz di ripetizione temporale dei semiquadri e, nello standard americano, 60 Hz di frequenza temporale e 525 righe a scansione interallacciata.

La televisione ad alta definizione prevede vari standard tra cui uno a scansione progressiva

di 720 righe attive ed uno a scansione interallacciata di 1080 righe attive.

La struttura dello schermo prevede invece un numero fisso di campioni che definiscono la risoluzione del display. Tale risoluzione può arrivare, per gli schermi con tecnologia LCD a 1600x1024 per gli schermi di piccole dimensioni ed a 1920x1200 per quelli di media dimensione, mentre è a 852x480 per i PDP a 42” e 1280x768 per i PDP da 50”. Nel caso dei PDP con tecnologia ALIS si riesce ad ottenere una risoluzione di 1024x1024 anche con schermi da 42”. I retroproiettori, come pure i proiettori hanno attualmente una risoluzione da 800x600 a 1280x1024 campioni.

Per adattare i vari formati del segnale d’ingresso al formato fisso del raster dello schermo è necessario attuare un’elaborazione del segnale d’ingresso, ossia una sua interpolazione. Nel caso di segnali interallacciati, tale operazione risulta molto delicata e può introdurre degradamenti in quanto deve utilizzare, per il calcolo di ogni pixel, sia informazioni spaziali che temporali. Nel caso in cui il segnale d’ingresso è degradato da difetti di codifica, codifiche PAL/SECAM/NTSC o compressioni digitali a basso bit-rate, l’operazione di interpolazione può enfatizzare i degradamenti [Nota 5]. Questo tipo di problema è comune a tutti i display di nuova generazione, TFT, Plasma, DMD, ecc., che utilizzano una pre-elaborazione del segnale d’ingresso.

Un’altra causa di amplificazione dei degradamenti presenti sul segnale è legata alle grandi dimensioni degli schermi di nuova tecnologia. Infatti, la distanza preferita dallo schermo televisivo (PVD – Preferred Viewing Distance), misurata in numero di volte l’altezza dello schermo, è molto grande con schermi di piccola dimensione, 7-8 volte l’altezza dello schermo e si riduce a circa 4 volte per schermi da 50” e di dimensioni superiori. Tale distanza potrebbe ulteriormente ridursi passando da schermi con presentazione interallacciata a schermi con presentazione progressiva dell’immagine [3], [4]. Tali valori sono il risultato di test fatti anni addietro al Centro Ricerche della Rai, in cui l’osservatore era libero di muoversi in un ambiente sufficientemente

Nota 1.
Con la tecnologia LCD risulta difficile fare schermi di dimensione superiore ai 25”, anche se recentemente sono apparsi sul mercato schermi di dimensioni superiori. Con la tecnologia PDP risulta d’altra parte agevole fare schermi di grandi dimensioni, tipicamente sono 42”e 50”, mentre è difficile fare schermi di dimensione inferiore senza perdere in risoluzione. Ciò nonostante stanno uscendo sul mercato anche schermi PDP a 32” e 60” che rappresentano le dimensioni limite attuali con questa tecnologia.

Nota 2.
In effetti, esiste anche un tipo di schermo al plasma a scansione interalacciata, denominato ALIS, Alternate LIghtning of Surface, che consente di mantenere un’elevata risoluzione verticale ed orizzontale anche su schermi da 42”.
La scansione interallacciata è quella usata dall’attuale segnale televisivo a definizione convenzionale, sia di tipo analogico che digitale. Essa consiste nella separazione del quadro televisivo in due semiquadri separati temporalmente di 20 ms. Nello standard europeo la frequenza di ripetizione del quadro è 25 Hz e quindi quella del semiquadro 50 Hz.
La scansione progressiva consiste di quadri, non più suddivisi in semiquadri.

Nota 3.
Con la sigla SDTV, Standard Definition Television si indicano i segnali televisivi a definizione convenzionale e scansione interallacciata formati da 625 righe, di cui 576 attive per l’immagine e 50Hz di ripetizione temporale dei semiquadri (standard europeo) e 525 righe, di cui circa 480 attive per l’immagine, e 60 Hz di ripetizione dei semiquadri (standard americano), vedere raccomandazioni ITU-R BT.470-6 e, per la versione digitale, ITU-R BT.601-5.

Nota 4.
Con la sigla HDTV, High Definition Television si indicano quei formati d’immagine, sia a scansione interallacciata che a scansione progressiva, con una risoluzione spaziale superiore a quella disponibile dallo standard SDTV. Gli standard HDTV sono definiti nelle raccomandazioni ITU-R BT.709-4 e BT.1543.

Nota 5.
Con segnali d’ingresso a scansione progressiva l’interpolazione viene effettuata utilizzando solamente informazioni spaziali, e quindi l’introduzione o l’enfatizzazione dei degradamenti, come rumore e artefatti di codifica, risulta meno probabile e comunque d’entità inferiore a quella che si avrebbe su segnali interallacciati.

Nota 6.
Il flicker su grandi aree uniformi identifica lo sfarfallio, od oscillazione rapida della luminosità, percepito dall'occhio umano sulle aree uniformi estese dell'immagine.
Tale disturbo è chiaramente rilevato nella televisione a standard europeo, 50Hz di ripetizione temporale, mentre è quasi assente in quella a standard americano, 60 Hz di ripetizione temporale.

Nota 7.
Il flicker di riga, più propriamente detto "interline twitter" è costituito da un'oscilla ione rapida della posizione della linea di contorno nelle transizioni verticali nette dell'immagine.
Tale fenomeno è tipico della visualizzazione su schermi a scansione interallacciata, mentre è assente su schermi a scansione progressiva. La visibilità del fenomeno è direttamente proporzionale alla distanza tra righe consecutive dello schermo, percepita dal punto di visione dell'osservatore, e quindi è più visibile su segnali SDTV che su segnali HDTV.

Nota 8.
Tale decisione è stata presa in una riunione specialistica EBU della fine '99 a cui hanno partecipato rappresentanti tecnici della RAI, BBC, ITC, IRT e dell'EBU.

grande, tale da non porre vincoli alla distanza stessa. Nell'ambiente domestico esistono invece i vincoli legati alle dimensioni della stanza che potrebbero costringere, con schermi grandi, ad una distanza di visione inferiore a quella individuata come distanza preferita. Chiaramente, più ci si avvicina allo schermo più aumenta la visibilità dei dettagli, e quindi diventano più percepibili anche rumore e difetti dell'immagine.

Un'ulteriore possibilità di amplificazione dei difetti presenti sul segnale potrebbe essere causata dalla visualizzazione delle immagini su schermi con presentazione progressiva. Con tale tipo di presentazione si migliora molto la qualità percepita di immagini non affette da degradamenti poiché si riduce il flicker su grandi aree uniformi[Nota 6] e si elimina il flicker di riga[Nota 7], che, però, è forse anche una fonte di mascheramento dei difetti sulle immagini degradate.

3. Impatto degli schermi piatti sulla produzione e trasmissione dei programmi televisivi

L'EBU/UER (European Broadcasting Union/ Unione Europea di Radiodiffusori) che rappresenta tutti i radiodiffusori pubblici europei si è posta, qualche anno addietro, la domanda di cosa potrebbe succedere nel mondo della produzione e della trasmissione se questa nuova generazione di schermi, in particolare gli schermi al plasma detti anche PDP, si diffondesse sul mercato come schermi domestici. Oggigiorno, a causa dell'elevato costo, questi tipi di schermo sono utilizzati quasi esclusivamente nell'ambiente professionale, ma il loro prezzo è destinato a ridursi, anche se, molto probabilmente, esso si stabilizzerà su valori non inferiori a 2500 - 3000 Euro.

Potrà quindi tale prezzo consentire un loro ingresso massiccio nel mercato consumer? Nell'ipotesi che questo possa avvenire, l'EBU [Nota 8] ha deciso di analizzare l'impatto che la diffusione di tali schermi potrebbe avere sulla produzione dei programmi televisivi e sulla loro diffusione. La prima domanda è stata quella di stabilire se tale tipo di schermo, con risoluzione 852x480 nei PDP da 42" e 1366x768 nei PDP da 50", sia ben sfruttato dai segnali a definizione convenzionale (SDTV) o se per sfruttarne appieno le caratteristiche sia necessario utilizzare segnali ad Alta Definizione (HDTV).

Per poter rispondere a tale domanda, nell'ottobre 2000 sono stati organizzati test di valutazione presso il Centro Ricerche Rai di Torino. Presso il Centro di Produzione di Torino si sono realizzate le riprese televisive delle sequenze da utilizzare nei test; le stesse scene sono state riprese nei vari formati a definizione convenzionale (SDTV) e ad alta definizione, in particolare nel formato 1080i, 1080 righe attive con scansione interallacciata, e 720P, 720 righe attive con scansione progressiva. Nell'articolo [5] è riportata la descrizione dettagliata delle riprese e dei test. I risultati dei test indicarono che la qualità del segnale SDTV di studio era più che adeguata ad uno schermo PDP da 42", risoluzione 852x480 pixel, mentre solo su PDP da 50", risoluzione 1280x768, si è apprezzata una qualità superiore delle immagini HDTV rispetto a quelle SDTV. Durante i test si decise anche di valutare, sugli schermi PDP, il materiale SDTV codificato in PAL ed in MPEG-2 a 4Mbit/s e la qualità di immagini di film commercializzati su DVD. I risultati indicarono una qualità molto scadente sia per il segnale PAL che per il segnale MPEG-2, mentre si notò una buona qualità d'immagine dei film su DVD. Tale test sollevò quindi il dubbio che i PDP, ed in generale i grandi schermi piatti, agissero come amplificatori di disturbi.

Sulla base di tali risultati si sentì l'esigenza, e di conseguenza si decise, di effettuare una seconda fase di test con lo scopo di determinare il minimo bit-rate, sia per segnali SDTV che HDTV, in grado di fornire una buona qualità dell'immagine sugli schermi al plasma. Il Centro Ricerche Rai effettuò una prima serie di test per valutare la qualità dei segnali SDTV codificati a vari bit-rate. I risultati di tali test sono riportati nell'articolo [6], pubblicato su questo stesso numero della rivista. L'articolo

è la traduzione italiana di quello presentato al convegno DVB World 2002 tenuto a Dublino il 6-7 marzo 2002.

I risultati indicarono che per ottenere una qualità giudicata buona può essere necessario un bit-rate di 8 - 10 Mbit/s con la codifica MPEG-2. La valutazione di qualità delle immagini fu fatta su schermi al plasma con risoluzione 852x480 e su un proiettore DMD, microspecchi, con risoluzione 800x600. I test evidenziarono che non soltanto gli schermi al plasma operavano come amplificatori dei difetti dell'immagine, ma anche grandi schermi piatti utilizzanti altre tecnologie si comportavano nello stesso modo. Il livello di qualità di immagine percepita su schermi CRT con codifica MPEG-2 a 6 Mbit/s era percepibile, sullo schermo al plasma, codificando a 8 - 10 Mbit/s.

Un'ulteriore serie di test fu effettuata successivamente dalla BBC – Research and Development Department, dall'SVT (Televisione Svedese), dall'IRT – Institut fur Rundfunktechnik (Istituto di Ricerca delle Televisioni Tedesche) e dal Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai di Torino. Questi test, di cui si riferirà in un articolo successivo, consistevano nella valutazione e confronto della qualità delle immagini HDTV 720P, HDTV 1080I e SDTV 576I codificate in MPEG-2 a vari bit-rate e visualizzate sugli schermi PDP da 50" con risoluzione 1280x768. I risultati ottenuti sono stati molto interessanti e sorprendenti, ma, come detto, di questo si riferirà in un prossimo articolo.

4. Interesse dell'EBU e della Rai ai test sugli schermi piatti di grande dimensione

L'interesse dell'EBU e della Rai, nonché degli altri radiodiffusori europei coinvolti nei test è stato quello di conoscere se l'avvento di questi schermi poteva avere forti implicazioni sul modo di produrre e di trasmettere la televisione, ossia se era necessario fare già oggi investimenti onerosi nel campo della produzione e della trasmissione.

In effetti, i test fatti sotto l'egida dell'EBU hanno indicato che una diffusione dei grandi schermi piatti nel mercato consumer renderebbe insufficiente il bit rate attualmente utilizzato per la televisione digitale, se si vuole fornire immagini di buona qualità. Con immagini a definizione convenzionale (SDTV), tale bit rate dovrebbe essere aumentato ad almeno 8 o 10 Mbit/s con la conseguente riduzione del numero di programmi in ogni bouquet digitale. Quest'evenienza creerebbe però notevoli problemi di carattere finanziario e di reperimento delle frequenze nel caso della televisione digitale terrestre. Infatti, il nuovo servizio digitale dovrà coesistere per alcuni anni con la televisione terrestre analogica e la quasi totalità dei canali disponibili è attualmente occupata da questo tipo di servizio.

Immagini HDTV fornirebbero un apprezzabile aumento di qualità rispetto a quelle SDTV solo se visualizzate su grandi schermi ad elevata risoluzione, come gli schermi al plasma da 50" con risoluzione 1280x768 [Nota 9]. Ma, per mantenere un significativo aumento di qualità rispetto al segnale SDTV nella distribuzione del segnale all'utenza domestica è necessario codificare il segnale a 19 Mbit/s, occupando di conseguenza un intero canale della Televisione Digitale Terrestre (DTT). Questo renderebbe ancora più difficile il reperimento delle risorse trasmissive. Considerati inoltre gli ingenti investimenti richiesti per la produzione di programmi HDTV, viene meno, oggi, l'interesse, da parte della Rai e della maggior parte dei radiodiffusori televisivi europei, per una generalizzata produzione in HDTV.

Nota 9.
Su schermi al plasma da 42" con risoluzione 852x480 il guadagno di qualità non risulta significativo.

Fortunatamente, il mercato di questi schermi è oggigiorno quasi esclusivamente di tipo professionale, in quanto il loro costo è estremamente elevato, specialmente per i PDP da 50". Anche considerando il trend di riduzione dei costi, si suppone che nei prossimi anni questi tipi di schermi non riusciranno ancora a penetrare in modo consistente nel mercato dell'utenza domestica. Nel frattempo, sono in fase di sviluppo e di standardizzazione nuovi sistemi di codifica, molto efficienti, in grado di fornire la stessa qualità visiva codificando ad un bit rate inferiore alla metà di quello attua-

le. Inoltre l'evoluzione della tecnologia potrà probabilmente consentire, nei prossimi anni, una nuova generazione di set top box con decodifica video/audio completamente software e quindi la possibilità di cambiare facilmente i sistemi di codifica, scaricando sui ricevitori domestici il relativo software di decodifica, via etere o via rete internet. Questo consentirà l'adozione di nuovi e sempre più efficienti sistemi di codifica in grado di fornire una qualità più che adeguata per gli schermi al plasma ed in generale per gli schermi piatti di nuova tecnologia e di grandi dimensioni.

Nel frattempo, si potrà pensare ad un miglioramento della qualità audiovisiva, non aumentando il bit rate destinato ad ogni programma, ma migliorando ulteriormente l'efficienza dei codificatori MPEG-2 e sfruttando il guadagno di qualità possibile con l'adozione della multiplazione statistica dei programmi.

5. Conclusioni

Schermi piatti di grandi dimensioni e con nuova tecnologia stanno comparendo sul mercato. Questi schermi, multi formato ed a scansione progressiva, potrebbero risultare critici per segnali televisivi analogici e digitali, degradati dai processi di codifica. A prima vista, sembrerebbe quindi necessario quasi raddoppiare il bit rate destinato alla trasmissione dei programmi che comporta, però, una riduzione di programmi per canale trasmissivo e quindi la necessità di reperire un numero consistente di canali per l'avvio del servizio di Televisione Digitale Terrestre. Quest'operazione risulta al momento molto difficoltosa, a causa dell'occupazione di questi canali da parte del servizio di Televisione Analogica Terrestre che continuerà ancora per parecchi anni.

Questa situazione non ha però risvolti drammatici in quanto questi tipi di schermi sono oggigiorno destinati, a causa del loro costo elevato, quasi esclusivamente al mercato professionale e non a quello consumer dei ricevitori domestici. E' inoltre probabile che, quando questi schermi inizieranno a penetrare in modo consistente nel mercato consumer, sia ormai a termine il servizio di televisione analogica e nuovi canali siano resi disponibili per il servizio di televisione digitale terrestre. Risulterebbe così possibile destinare un maggiore bit rate ai singoli programmi. Inoltre, potrebbero apparire a medio termine sul mercato set top box di nuova generazione, in grado di consentire la migrazione a nuovi sistemi di codifica più efficienti dell'MPEG-2 attuale.

Bibliografia

1. G. Barbieri: “Schermi piatti: sviluppi e applicazioni” - Elettronica e Telecomunicazioni, pp.3-9, n.3, Dicembre 2000

2. M. Barbero, N. Shpuza: “Sistemi di proiezione basati su microspecchi” - Elettronica e Telecomunicazioni, pp.14-23, n.3, Dicembre 2000

3. M. Ardito: “Distanza di osservazione preferita per programmi HDTV” – Elettronica e Telecomunicazioni pp. 86-92, n.3, 1994

4. M. Ardito, M. Gunetti, M.Visca: “Influence of Display Parameters on Perceived HDTV Quality” – IEEE Transactions on Consumer Electronics, pp. 145-155, Volume 42, Number 1, February 1996

5. M. Barbero: “Valutazione dell'impatto potenziale degli schermi piatti sulla catena di produzione televisiva” - Elettronica e Telecomunicazioni, pp. 10-13, n.3, Dicembre 2000

6. M. Stroppiana, D. Wood: “L'avvento dei display a schermo piatto potrà cambiare il modo di trasmettere la televisione digitale”, Elettronica e Telecomunicazioni, questo numero

L'avvento dei display a schermo piatto potrà cambiare il modo di trasmettere la televisione digitale?

Mario **Stroppiana**
Rai
Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Torino

David **Wood**
EBU - UER
European Broadcasting Union
Union Européenne de Radio-Télévision
Genève

Sommario

Questo articolo illustra due fasi di test di valutazione della qualità audiovisiva percepibile sui display a schermo piatto effettuati dai broadcaster europei tra ottobre 2000 e marzo 2002. I test esaminavano un argomento critico per il futuro della trasmissione DVB, ossia le possibili implicazioni sulla trasmissione televisiva digitale, se è vero, come i produttori asseriscono, che gli attuali schermi televisivi domestici saranno in buona parte rimpiazzati dagli schermi piatti nel giro di pochi anni. Se così fosse, la prassi tuttora consolidata di raggruppare un numero elevato di programmi televisivi sui singoli canali digitali, potrebbe risultare sbagliata e quindi da rivedere.
L'articolo riporta il risultato del lavoro iniziale e le considerazioni preliminari, con l'intenzione di allargare l'interesse verso questi problemi. L'effetto della codifica e decodifica sulla qualità globale dell'immagine dipende dal contesto e dal contenuto delle immagini stesse. Le valutazioni di carattere generale della qualità dell'immagine devono avere sempre presente questo aspetto; comprendere le ripercussioni sulla qualità è più complicato che determinare i valori medi o massimi istantanei di degradamento della stessa. Il lavoro presentato in questo articolo, dovrebbe costituire solo l'inizio per arrivare a questa comprensione.

1. Introduzione

Nel 1999, un gruppo di membri EBU e la Direzione Generale dell'EBU cominciarono a valutare più distintamente le implicazioni che derivano dall'utilizzo, in ambito domestico, dei nuovi tipi di display a schermo piatto, in particolare quelli al plasma, detti anche PDP - Plasma Display Panels.

In tale occasione, si concluse che gli schermi piatti sarebbero potuti diventare, nel giro di cinque anni, il sistema di visualizzazione più venduto in Europa.

Tale affermazione si basava sulla dichiarazione dei principali produttori di ricevitori domestici che indicava, in quell'intervallo di tempo, un crollo dei prezzi degli schermi al plasma tale da portarli allo stesso livello di costo degli schermi a tecnologia CRT - Cathode Ray Tube. A parità di prezzo, si pensava che il pubblico avrebbe scelto gli schermi piatti perché più sottili, e quindi meno ingombranti, e più luminosi.

Con la collaborazione dei produttori di display, nell'autunno del 2000, fu organizzata una sessione di valutazione alla RAI presso il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica di Torino.

L'obiettivo fondamentale del test era sia quello di ottenere un più esauriente panorama di informazioni sui display a schermo piatto, sia rispondere alla specifica domanda: "se i display a schermo piatto diventassero il sistema di visualizzazione dominante nell'ambiente domestico, sarebbero necessari cambiamenti nella produzione e diffusione dei programmi televisivi?"

Purtroppo, non esiste una sfera di cristallo in grado di predire se i prezzi diminuiranno realmente, come ipotizzato dalle industrie costruttrici. Al momento attuale, la prevista caduta dei prezzi del 20% all'anno non si è verificata, forse a causa dell'influenza della flessione economica. Nondimeno, anche se al momento non si individuano segnali che indichino una veloce espansione di questi display, non sarebbe prudente ignorare tale fenomeno e non pensare a predisporre misure in grado di poterlo gestire correttamente.

L'obiettivo complessivo dei test era quello di verificare l'impatto della nuova generazione di schermi, principalmente quelli al plasma (PDP), rispetto alla qualità percepita per i normali programmi TV (codificati secondo lo

standard DVB Nota 1) e di valutare l'eventuale valore aggiunto dall'utilizzo di immagini generate nei formati ad alta definizione.

A tale scopo si è generato il materiale di test, a qualità studio, riprendendo in studio, nei formati SDTV Nota 2 ed HDTV Nota 3 le stesse scene dal vivo, e le stesse sequenze di test, test pattern. Sono stati utilizzati, in SDTV, il formato interallacciato a 625 righe (576 righe attive per l'immagine), 50 Hz (formato conosciuto come standard 601) ed il formato progressivo a 625 righe, 25 Hz. I formati HDTV utilizzati sono invece stati quello a 720 righe attive progressive, 60 Hz e quello 1080 righe attive, scansione interallacciata, 50 Hz. Al fine di ottenere una prima valutazione dei degradamenti introdotti dai canali di diffusione, il materiale, ripreso o convertito in SDTV, è stato codificato in forma analogica PAL ed in forma digitale MPEG-2 a 4 Mbit/s; inoltre si sono selezionati brani di film registrati su DVD, reperibili sul normale mercato di vendita e noleggio di film per usi domestici.

Per i test si sono utilizzati display con schermo al plasma, PDP commercialmente disponibili nei formati WideVGA, risoluzione 852x480 pixel, WideXGA, risoluzione 1280x768 pixel, PDP ALIS, risoluzione 1024x1024 Nota 4. Le dimensioni degli schermi erano 42'' e 50" in diagonale, con aspect ratio (rapporto di forma) pari a 16/9.

Le valutazioni hanno consentito la formulazione di considerazioni preliminari, alcune delle quali previste, altre completamente sorprendenti. Naturalmente tali conclusioni dovranno essere confermate da successivi test formali di valutazione della qualità pesate sulla base di statistiche sul contenuto dei programmi.

Le principali conclusioni raggiunte sono state:

- I display al plasma con interfaccia WideVGA (852x480 pixel) sono schermi eccellenti, ma non completamente trasparenti al segnale SDTV con qualità studio. Se quindi fosse possibile mantenere la qualità studio lungo la catena di trasmissione e diffusione, fino a casa dell'utente, la qualità fornita dal segnale SDTV, conforme alla Raccomandazione 601, sfrutterebbe appieno le prestazioni di qualità di tali schermi ed il miglioramento ottenibile con segnali HDTV risulterebbe molto marginale.
- Un apprezzabile guadagno di qualità dell'HDTV rispetto all'SDTV si ha invece su schermi al plasma con interfaccia WideXGA (PDP da 50" con risoluzione 1280x768), oppure su PDP con tecnologia ALIS, risoluzione 1024x1024.
- La qualità dei segnali SDTV non compressi (standard 601) su WideVGA, rimane molto buona anche dopo aver subito trattamenti tipici dell'ambiente di produzione come la multigenerazione di segnali compressi a 50 Mbit/s, standard di compressione per lo studio TV.
- Una qualità molto scadente è stata invece percepita, su tutti i tipi di schermi al plasma,

Nota 1.
Il DVB – Digital Video Broadcasting Project è un consorzio europeo, costituito da oltre 300 membri tra cui broadcaster, costruttori, operatori di rete sviluppatori di software, organismi di standardizzazione, il cui scopo è la definizione di uno standard globale europeo per la trasmissione all'utente della televisione digitale e di servizi dati.

Nota 2.
Con la sigla SDTV si intende la televisione a definizione convenzionale definita, in ambiente digitale, dalla raccomandazione internazionale ITU-R BT.601. Per quanto riguarda l'ambito europeo ogni quadro di tale segnale è costituito da 625 righe, di cui 576 attive per l'immagine, che si ripetono con una frequenza di 25 Hz, suddivise in due semiquadri che distano 20 ms tra loro.

Nota 3.
Con la sigla HDTV si intendono quei formati televisivi che presentano una definizione verticale ed orizzontale superiore di quella dei formati SDTV e definiti dalla raccomandazione internazionale ITU-R BT.709 e BT.1543.

Nota 4.
La tecnologia ALIS – Alternate Lighting of Surface utilizza un tipo di scansione interallacciata e consente un'elevata risoluzione verticale ed orizzontale anche su schermi al plasma di dimensioni ridotte, ad esempio 42".

con immagini SDTV codificate in MPEG-2 a 4 Mbit/s, oppure codificate PAL Nota 5.
- E' stata invece valutata molto buona la qualità delle immagini dei film commercializzati su supporti DVD con codifica MPEG-2.

I risultati di queste valutazioni EBU fatte a Torino presso il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della RAI hanno accelerato la decisione di organizzare ed effettuare una seconda fase di test, con l'obiettivo di individuare il bit-rate necessario per portare a casa dell'utente immagini SDTV o HDTV di buona qualità, mediante canali digitali terrestri, via cavo o via satellite.

2. Considerazioni generali sulla codifica di segnali SDTV e HDTV

I test hanno indicato che se le immagini sono pulite e nitide, ossia non affette dai disturbi di codifica, la qualità dell'immagine resa dallo schermo al plasma è notevolmente apprezzata dallo spettatore. Se invece l'immagine è degradata dalla compressione MPEG a bassi bit-rate o dalla codifica PAL, gli schermi al plasma si comportano come amplificatori di disturbi e degradano ulteriormente il segnale.

Questo effetto è probabilmente collegato ad un aumento della percezione visiva del rumore strutturato all'aumentare della sua dimensione spaziale ed ai degradamenti introdotti dalla pre-elaborazione di segnali affetti da rumore di codifica.

Tutti gli schermi al plasma, come gli schermi piatti di nuova tecnologia (TFT – Thin Film Transistor, DMD - Digital Micromirror Device [micro specchi], ecc.) usano sistemi di pre-elaborazione per convertire il segnale di ingresso al formato dello schermo: il loro utilizzo, e forse anche gli algoritmi, sono differenti per le diverse case produttrici. I costruttori sono molto favorevoli ad una maggiore attività di ricerca sui meccanismi di amplificazione dei disturbi da parte dei display a schermo grande, come pure ad un tentativo di standardizzazione delle interfacce e delle caratteristiche degli schermi al plasma.

Per rendere giustizia agli schermi PDP in ambiente domestico, sarà quindi necessario trasmettere la TV digitale codificata con un bit-rate sufficientemente elevato, tale da evitare significativi degradamenti dell'immagine. Ovviamente il bit-rate necessario dipende dallo standard, SDTV o HDTV, e dal contenuto del segnale televisivo; a parità di condizioni, un segnale televisivo ad alta definizione (HDTV), richiede un bit-rate più elevato di un segnale televisivo a definizione convenzionale (SDTV). Inoltre è molto probabile che la qualità di un'immagine ad alta definizione, ma degradata, sia valutata di qualità inferiore rispetto ad un'immagine a definizione convenzionale, ma di buona qualità.

I test EBU hanno indicato che quando i display a grande schermo, ed in particolare quelli al plasma, saranno molto diffusi, un bit-rate di 4-4,5 Mbit/s, attualmente usato per la diffusione della maggior parte di programmi digitali in Europa, potrebbe non essere più considerato accettabile da parte degli spettatori. Inoltre, se si volessero trasmettere all'utente programmi in alta definizione, il bit-rate necessario per sfruttare le potenzialità dello schermo dovrebbe essere ancora più alto ed un segnale HDTV a 1080 righe interallacciato, richiederebbe, a parità di qualità, un bit-rate più elevato di un segnale progressivo a 720 righe, che presenta vantaggi di codifica legati al suo formato progressivo di scansione.

Molti membri dell'EBU pensano che il pubblico attuale sia già molto soddisfatto della qualità disponibile dalla trasmissione digitale del segnale televisivo a definizione convenzionale, definito dalla raccomandazione ITU-R BT.601, e che non ci siano quindi margini commerciali per la trasmissione dell'alta definizione. Ritengono quindi che non sia vantaggioso investire in un'evoluzione dalla SDTV verso la HDTV, pagando quattro o cinque volte di più per le risorse trasmissive. In ogni caso, molti broadcaster europei troverebbero grandi difficoltà a reperire canali trasmissivi per i servizi in HDTV.

Nota 5.
Si presume che si abbia una qualità scadente anche con segnali codificati in SECAM, anche se questo test specifico non è stato fatto.

Nota 6.
I risultati dei test saranno oggetto di un successivo articolo su questa rivista. Tali risultati sono comunque in accordo con quanto riportato nel presente articolo.

Nota 7.
I riferimenti temporali sono quelli dell'articolo originale.

Nota 8.
La struttura di GOP 12,3 indica che la sequenza d'immagini è suddivisa in gruppi di 12 di cui la prima è codificata in modo solo Intra (I-frame), mentre le altre sono codificate con predizione temporale solo all'indietro (P-frame) o nelle due direzione, indietro ed avanti (B-frame). Il numero 3 indica che ci sono sempre 2 B-frame tra due successivi P-frame o tra l'I-frame ed il successivo P-frame. La suddivisione delle immagini in GOP è tipica dello standard di codifica MPEG-2, mentre il valore 12,3 indica uno dei possibili modi di codifica consentiti dallo standard.

Nota 9.
La distanza dallo schermo di visione viene misurata in numero di volte l'altezza dello schermo stesso. Tale distanza è definita in 4H o 6H, 4 o 6 volte l'altezza dello schermo stesso, per le valutazione soggettive della qualità di immagini SDTV, televisione a definizione

D'altra parte, ci sono anche membri EBU che pensano di essere in grado di reperire un numero sufficiente di canali trasmissivi e che ritengono che il guadagno di qualità, ottenuto migrando all'HDTV, abbia un valore superiore a quello pagato per gli investimenti necessari nei settori della produzione e della trasmissione. Una giustificazione di questo fatto è che i paesi più piccoli, pur avendo un numero di canali a disposizione uguale a quello dei paesi grandi, non dispongono di una capacità di produzione di programmi in grado di riempirli. Con l'introduzione dell'HDTV tali paesi otterrebbero quindi un miglior sfruttamento dello spettro trasmissivo e fornirebbero all'utente un servizio con immagini di migliore qualità.

Nonostante quindi i differenti punti di vista, i membri dell'EBU si sono accordati per procedere ad una seconda fase di test, con l'obiettivo di comparare la qualità dei segnali SDTV e HDTV, e di indicare il minimo bit-rate di codifica necessario per la compressione MPEG-2, in uno scenario di utenza provvista di display a schermo grande. I risultati di questa seconda fase di test si sono resi disponibili a primavera 2002 inoltrata [Nota 6].

Nel momento in cui si scrive questo articolo, sono disponibili una prima serie di risultati desumibili dai test fatti alla RAI nell'autunno 2001 e riportati nel paragrafo seguente [Nota 7].

3. Test preliminari sulla qualità delle immagini SDTV compresse in MPEG-2

Test preliminari, con valutazioni qualitative, sono stati condotti per determinare una curva della qualità dell'immagine in funzione del bit-rate, per segnali visualizzati su display a grande schermo ed in particolare su schermi al plasma e su proiettore microspecchi.

3.1 Descrizione dei test

Il materiale usato per la visione è stato suddiviso in quattro differenti gruppi.

Il Gruppo 1 è composto da sequenze di immagini tratte dalla libreria di sequenze del Centro Ricerche RAI. L'archivio contiene sequenze di test come "Mobile and Calendar", "Renata/Butterfly", etc. e sequenze d'immagini tratte da Telegiornali, Sport, Spettacolo, etc., riprese dalla RAI. Queste sequenze sono considerate esempi tipici del materiale più impegnativo che può presentarsi nei programmi e nei notiziari televisivi.

Il Gruppo 2 contiene sequenze d'immagini sintetiche e dal vivo (live), riprese in SDTV nell'ottobre 2000 presso il Centro di Produzione RAI di Torino, durante la prima fase di test EBU sugli schermi PDP. Le sequenze del Gruppo 2 presentano una criticità di codifica molto bassa. Il materiale ripreso in quell'occasione non aveva, infatti, lo scopo di testare i codificatori MPEG, ma piuttosto di esaminare le caratteristiche degli schermi PDP.

Le sequenze del Gruppo 3, hanno lo stesso contenuto di quelle incluse nel Gruppo 2, ma sono state riprese in HDTV e poi convertite in SDTV. Il materiale del Gruppo 3 risulta più critico di quello del Gruppo 2, perché può presentare una maggiore occupazione spettrale, ossia più energia alle alte frequenze.

Il materiale indicato è stato codificato in MPEG-2 MP@ML (Main Profile at Main Level) a 4, 6, 8, 10 e 12 Mbit/s con un codificatore hardware e con una struttura di GOP (Group Of Picture) di 12,3 [Nota 8].

3.2 Valutazioni di qualità

La qualità dell'immagine è stata valutata con la metodologia "Expert Viewing" con gli osservatori esperti posti ad una distanza 4H [Nota 9] dai display con schermo al plasma e 2,5 H dallo schermo del proiettore.

Le sequenze d'immagini, codificate a 4, 6, 8, 10, 12 Mbit/s e non codificate sono state presentate sequenzialmente, come nel test a singolo stimolo, sui seguenti schermi:

- due PDP a 42" con risoluzione di 852 x 480

pixel (uno di prima generazione e uno di nuova generazione),
- un proiettore digitale a microspecchi con una risoluzione di 848 x 600 pixel (luminosità da 5000 lumen),
- uno schermo professionale CRT (Cathode Ray Tube) utilizzato come riferimento.

I tre gruppi di sequenze sono stati valutati separatamente utilizzando la scala di qualità a 5 livelli (1-pessima, 2-cattiva, 3-discreta, 4-buona, 5-ottima).

In generale la qualità percepita sui PDP e sul dispositivo a microspecchi, era quasi la stessa, sebbene il PDP di ultima generazione sia risultato il più critico per la maggior visibilità dei disturbi di codifica.

La figura 1 riporta i risultati, al variare del bit-rate, della valutazioni di qualità delle sequenze del "Gruppo 1" indicando il valore medio delle valutazioni degli osservatori sui tre display, due PDP ed un proiettore, ed i valori minimi e massimi delle valutazioni.

Come già detto, il contenuto delle sequenze incluse nei Gruppi 2 e 3, è meno critico di quello del Gruppo 1 nei riguardi della codifica MPEG-2.

Al fine di evidenziare tale asserzione si riportano, in figura 2, le curve della qualità media per i tre gruppi di sequenze.

I risultati delle valutazioni di qualità su grande schermo, PDP e proiettore, riportati nelle figure 1 e 2, in completo accordo con i risultati di ulteriori confronti fatti nel modo "split screen" Nota 10, indicano quanto segue:

- Le sequenze del "gruppo 1", codificate ad 8 Mbit/s presentano una qualità migliore di un grado delle stesse codificate a 4 Mbit/s. Le sequenze del "gruppo 2", non critiche per quanto riguarda la codifica MPEG, hanno già una qualità discreta a 4 Mbit/s e migliorano di solo mezzo grado passando da 4 a 8 Mbit/s.
- La codifica MPEG-2 a 12 Mbit/s è soggettivamente trasparente per tutte le sequenze provate nei test.
- La qualità delle sequenze codificate a 8 Mbit/s è stata giudicata un grado inferiore delle stesse non codificate.

Per valutare l'effetto di amplificazione dei disturbi causato dalla visualizzazione delle immagini su grande schermo ed in particolare sugli schermi al plasma si è confrontata la loro qualità con quella valutata su monitor professionali con schermo CRT. Da questi

convenzionale, ITU-R BT.1192-2. Le metodologie per la valutazione della qualità sono riportate nella raccomandazione ITU-R BT.500-10.

Nota 10.
La modalità "split screen" consiste nella suddivisione orizzontale dello schermo in due zone nelle quali vengono visualizzate le due immagini da con rontare tra loro.

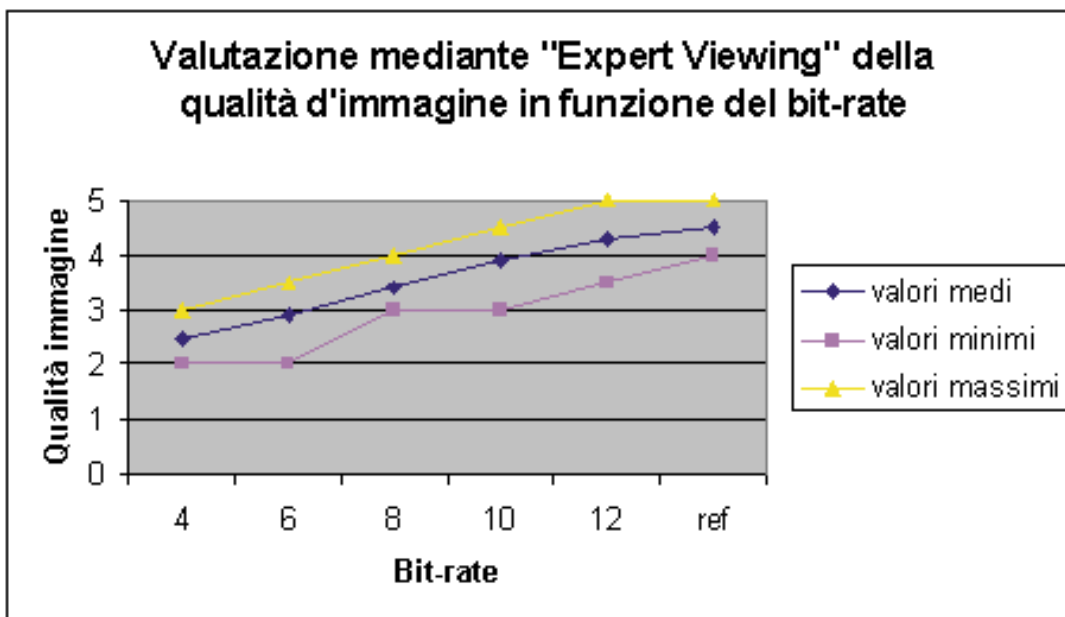
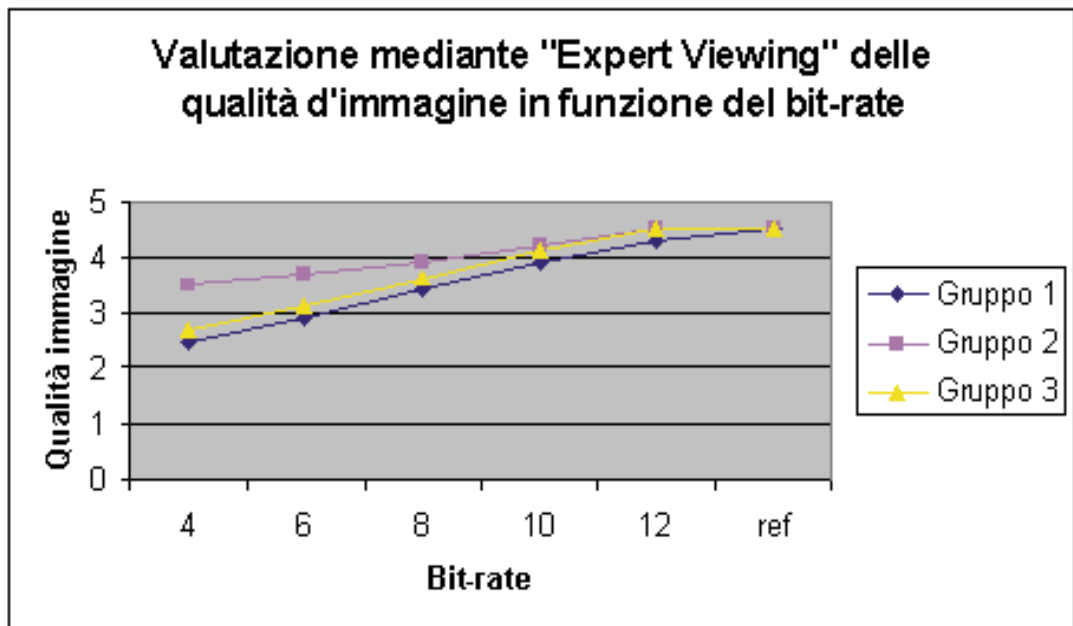



Fig. 1 - Qualità media in funzione del bit-rate e valori minimi e massimi delle sequenze del "gruppo 1". La valutazione è stata fatta su display da 42" con schermo al plasma e sul proiettore a micro specchi.

Fig. 2. Qualità media delle sequenze dei Gruppi 1, 2 e 3 in funzione del bit-rate. La valutazione è stata fatta su display da 42” con schermo al plasma di nuova generazione.

confronti è emerso che, con sequenze codificate in MPEG-2 a 4 e 6 Mbit/s, la qualità d’immagine apprezzata su monitor CRT era da 0,5 ad 1 grado migliore di quella percepita sullo schermo al plasma. Per percepire su uno schermo al plasma la stessa qualità d’immagine valutata su schermo CRT ad un bit-rate di 6 Mbit/s sarebbe quindi necessario codificare le sequenze ad un bit-rate compreso tra 8 e 10 Mbit/s. Se ne conclude che gli schermi al plasma ed il grande schermo in generale si comportano come amplificatori di disturbi e che una loro eventuale diffusione tra l’utenza domestica richiederebbe una revisione del bit-rate assegnato ai singoli programmi per la loro trasmissione. Infatti, per avere sistematicamente una qualità del segnale a definizione convenzionale inferiore di non più di un grado rispetto alla qualità da studio risulta necessario codificare il segnale SDTV ad almeno 7-8 Mbit/s. Se invece si vuole sistematicamente ottenere una qualità soggettivamente trasparente a quella di studio, che implica un degradamento non superiore a 0,5 gradi, risulta necessario un bit-rate di almeno 10 Mbit/s.

E’ importante sottolineare che i risultati riportati devono essere assunti come dati indicativi; sarebbero estremamente utili ulteriori informazioni indicanti le relazioni esistenti tra il bit-rate, la criticità delle immagini, la statistica della criticità delle immagini e della loro frequenza divisa per genere e per canale.

4. Il potenziale impatto degli schermi al plasma sulla televisione digitale terrestre

Fino ad oggi lo schermo a raggi catodici (CRT) è stato pressoché l’unico tipo di schermo presente nelle case degli utenti televisivi. Le dimensioni di tali schermi sono state, per molti anni, inferiori ai 25-28”. Solo recentemente sono apparsi sul mercato schermi da 32”, sempre con tubo a raggi catodici.

La qualità dell’immagine resa da tali schermi, con segnali analogici PAL o digitali con codifica MPEG-2 a 5 Mbit/s è stata considerata finora sufficiente ed adeguata per il servizio televisivo. Inoltre, la qualità delle immagini registrate su cassette VHS, che potrebbe essere messa a confronto con la qualità delle immagini distribuite dai broadcaster, è inferiore a quella del segnale ricevuto dall’antenna, sia esso codificato PAL od MPEG-2.

Il mercato però si sta evolvendo tecnologicamente. Grandi schermi, siano essi proiettori, retroproiettori o schermi al plasma, stanno apparendo sul mercato, seppure in modeste quantità. Il loro prezzo attuale è, comunque, ancora molto alto e questo rappresenta oggi il maggiore ostacolo ad una loro penetrazione massiccia.

D'altra parte, la tecnologia DVD è ormai largamente utilizzata al posto della cassetta VHS per il commercio domestico dei film, vendita e/o noleggio. Come evidenziato dai test EBU fatti a Torino nell'ottobre 2000 e riportati nella prima parte di quest'articolo, la qualità delle immagini dei film su DVD è elevata, sia sui tradizionali schermi con tubo a raggi catodici che sui nuovi schermi piatti come quelli al plasma.

L'utente provvisto di schermi a nuova tecnologia e di lettori DVD sarà portato a confrontare la qualità d'immagine dei film registrati sul suo DVD con quella delle immagini ricevute dai tradizionali canali trasmissivi, analogici o digitali. Per fornire sistematicamente su schermi al plasma da 42", risoluzione 768x480 [Nota 11], immagini di qualità confrontabile con quella dei film su DVD risulta quindi necessario codificare il segnale MPEG-2 con almeno 7 o 8 Mbit/s.

La televisione digitale terrestre, DTT - Digital Terrestrial Television, può essere allocata nella banda VHF (7 MHz di banda per canale) o nella banda UHF (8 MHz di banda disponibile per canale). Nel primo caso la capacità tipica di banda totale per i programmi ed i servizi multimediali è di 21 Mbit/s che diventano 24 Mbit/s nel secondo caso. I canali DTT prevedono, come detto, l'inserimento di nuovi servizi multimediali come la televisione interattiva, la guida elettronica dei programmi (EPG Electronic Program Guide), il tele-shopping, etc., supportati dalla piattaforma MHP (Multimedia Home Platform) o altre piattaforme multimediali. Sebbene non sia possibile determinare oggi con esattezza la capacità necessaria per tali servizi, si può comunque ipotizzare che la loro richiesta di capacità aumenti e possano essere richiesti anche 3 o 4 Mbit/s per bouquet, riducendo così a soli 17-18 Mbit/s o 20-21 Mbit/s il bit-rate disponibile per i programmi. Questo fatto significa che, nel caso di televisione a definizione convenzionale (SDTV), per avere sugli schermi al plasma una qualità d'immagine pressoché trasparente a quella da studio, risulta possibile inserire solo due programmi televisivi per canale trasmissivo. Questa previsione non è realistica e quindi potrebbe essere più sensato proporre l'accorpamento di tre programmi TV per canale, sebbene ciò comporti l'assegnazione ad ogni programma di un bit-rate inferiore a quello necessario per sfruttare completamente le potenzialità degli schermi al plasma. Anche questa proposta, pur attenuata, risulta difficilmente realizzabile da molti broadcaster europei, sia per la difficoltà a reperire frequenze per il servizio di televisione terrestre, sia perché l'utente è attratto da un incremento del numero di programmi offerto. Infatti il nuovo servizio deve fornire un bouquet ricco di programmi al fine di compensare la spesa richiesta all'utente per attrezzarsi per la ricezione dei canali digitali.

D'altra parte, a differenza di quanto sostenuto dai costruttori, sembra poco probabile, a causa dei prezzi tuttora elevati, che gli schermi al plasma o i grandi schermi piatti si diffondano sul mercato nei prossimi due o tre anni e quindi i broadcaster hanno tempo per pensare a nuove soluzioni e sviluppare proprie strategie. E' quindi ragionevole, per alcuni anni ancora, inserire quattro o cinque programmi TV per canale trasmissivo destinando un bit-rate di 4 o 5 Mbit/s per ogni programma ed ottenere quindi una qualità d'immagine adeguata per gli schermi con tubo a raggi catodici. Un primo miglioramento della qualità si potrà avere adottando al posto di codificatori a bit-rate costante (CBR), codificatori a bit-rate variabile (VBR) con multiplazione statistica dei programmi, effettuando quindi un'allocazione dinamica di bit-rate in funzione della priorità del programma e della sua criticità di codifica[Nota_12].

In futuro, quando una percentuale significativa di utenti sarà provvista di schermi al plasma, il servizio di televisione terrestre analogica sarà probabilmente terminato e quindi ulteriori canali trasmissivi saranno forse disponibili per il servizio di televisione digitale terrestre. In tale caso sarebbe allora possibile ottimizzare

Nota 11.
Con schermi al plasma da 50", risoluzione 1280x780, sarebbe richiesto un bit rate anche superiore.

Nota 12.
Sfortunatamente, i vantaggi della multiplazione statistica aumentano all'aumentare del numero di programmi inseriti sullo stesso canale e quindi i maggiori vantaggi si otterrebbero sui canali satellitari dove la disponibilita di capacità è, ironia della sorte, maggiore di quella disponibile sui canali terrestri.

lo sfruttamento della banda, ridistribuendo i programmi TV nell'ambito dei bouquet e destinare quindi più bit-rate ad ogni programma, assicurando una qualità delle immagini adeguata anche per i display a schermo piatto di nuova tecnologia.

I risultati indicati sono basati su test di valutazione della qualità fatti con la metodologia "Expert Viewing", meno precisa delle formali valutazioni di tipo soggettivo. I risultati sono, comunque, in accordo con l'esperienza e con test informali fatti anche da altri broadcaster europei. Inoltre, l'EBU ha programmato lo svolgimento di test formali di valutazione Nota 13 i cui risultati appariranno su un articolo della rivista tecnica EBU.

Sulla base dei risultati indicati si può tentare di trarre considerazioni preliminari riguardo alla trasmissione di segnali HDTV ad un utenza provvista di display a schermo piatto. Si presuppone che tale utenza sia dotata di schermi al plasma con risoluzione WideXGA o 1024x1024 Nota 14, con dimensione probabile dello schermo di 50".

Il segnale HDTV 1080i, 1080 righe attive ed a scansione interallacciata definito dalla Raccomandazione ITU-R BT.709, ha cinque volte il numero di campioni del segnale 576i, 576 righe attive e scansione interallacciata definito dalla Raccomandazione ITU-R BT.601. Il bit-rate necessario per comprimere il segnale HDTV con uguale entità di degradamento percettivo non risulta cinque volte superiore a quello necessario per il segnale SDTV perché il degradamento percettivo non aumenta linearmente all'aumentare del numero di campioni, ma aumenta in misura inferiore in quanto:

- aumenta l'efficienza di codifica legata ad una maggiore correlazione spaziale del segnale e ad un aumento del buffer di codifica,
- i degradamenti di codifica risultano meno visibili perché di dimensione più piccola,
- lo schermo al plasma per l'HDTV da 50" non è cinque volte più grande di quello per SDTV da 42".

Ipotizzando quindi che la compressione del segnale HDTV richieda un bit-rate tre volte superiore a quello richiesto per la compressione del segnale SDTV, c'è il rischio che il bit-rate necessario per la trasmissione di un segnale HDTV 1080i privo di degradamenti visibili sia superiore alla capacità del canale digitale terrestre e a maggior ragione non sia possibile utilizzare un solo canale per la trasmissione contemporanea del segnale HDTV e della sua versione SDTV, trasmissione in simulcast.

Si potrebbe usare lo standard HDTV 720p (720 righe attive e scansione progressiva definito dalla Raccomandazione ITU-R BT 1543) più efficiente per gli aspetti di codifica e quindi richiedente, a parità di rumore di codifica, un bit-rate inferiore a quello richiesto dal segnale 1080i, ma anche in questo caso potrebbe essere necessario un bit-rate elevato per la capacità del canale trasmissivo e comunque non tale da poter effettuare una trasmissione in simulcast. Al fine di consentirne la trasmissione, si potrebbe ancora pre-filtrare il segnale HDTV, ma potrebbe venir meno, in tale caso, il vantaggio di trasmettere il segnale ad alta definizione invece di quello a definizione convenzionale.

Poiché lo standard 720p è molto più recente di

Nota 13.
I test di valutazione sono stati fatti a marzo 2002 dalla BBC, dalla SVT (Televisione Svedese) dall'IRT (Istituto di ricerca dei broadcaster pubblici tedeschi) e dal Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della RAI ed i risultati di tali test sono stati resi noti alla Task Force sugli schermi piatti nella riunione UER di fine marzo 2002, fatta alla BBC di Kinswood Warren. Tali test, hanno preso in esame anche i formati di Televisione ad Alta Definizione (HDTV) ed hanno confermato i risultati riportati nell'articolo. Il presente articolo non riporta i risultati di tali test in quanto è la traduzione di un articolo presentato alla Conferenza DVB 2002 di Dublino in data precedente all'esecuzione dei test UER indicati. I risultati dei test UER saranno comunque oggetto di un articolo.

Nota 14.
L'interfaccia WideXGA consente una risoluzione di 1366x768 punti, mentre l'interfaccia WideVGA è usata per una risoluzione di 852x480. La risoluzione 1024x1024 si ottiene, anche su schermi al plasma di 42", con la tecnologia ALIS, Alternate LIghtning of Surface, che è una tecnologia a scansione interallacciata.

quello relativo al 1080i, il vantaggio teorico di tale segnale nei confronti del 1080i potrebbe essere inutile se non risultassero disponibili, per tale standard, apparati di produzione con un livello di maturità tecnologica uguale a quelli per la produzione del segnale 1080i.

Un'alternativa a lungo termine potrebbe essere infine rappresentata dalla migrazione del sistema di compressione MPEG-2 ad un altro sistema di codifica molto più efficiente, come ad esempio quello in via di definizione e noto come H.26L. Tale argomento, attualmente solo ipotizzato, merita un interesse di studio e sperimentazione, nonché di valutazione e analisi delle implicazioni derivanti da un suo eventuale utilizzo.

5. Conclusioni

Se, come previsto dai costruttori, i display a grande schermo si diffonderanno come schermi domestici, gli attuali criteri di assegnazione del bit-rate per il singolo programma TV potrebbero non essere più soddisfacenti. Gli schermi al plasma, infatti, consentono un'ottima resa dei segnali puliti, ma agiscono come amplificatori di disturbi sui segnali affetti da degradamenti e rumore di codifica. Per rendere sistematicamente giustizia delle potenzialità di qualità di detti schermi risulterà quindi necessario, con gli attuali sistemi di codifica, comprimere i singoli programmi ad un bit-rate superiore a quello adottato oggi.

Le aspettative degli utenti potrebbero inoltre aumentare in quanto il mercato dei film in DVD si sta sempre più diffondendo e le immagini disponibili con tale tecnologia risultano di alta qualità anche sui grandi schermi al plasma. Sebbene la richiesta di bit-rate sia legata al contenuto dell'immagine ed alla statistica della criticità di codifica dei singoli programmi inseriti sullo stesso canale, per trasmettere la televisione a definizione convenzionale con una qualità sistematicamente buona può essere necessario elevare il bit-rate a circa 8-10 Mbit/s per programma.

A breve comunque il mondo sarà ancora dominato dagli schermi con tubo a raggi catodici e quindi è tuttora ragionevole inserire anche cinque programmi in un canale di televisione digitale, ma con il rischio che questo numero debba essere ridotto in futuro se si mantengono le attuali tecnologie di compressione. Quando questo avverrà dipenderà molto dalla situazione economica delle singole nazioni e dalla politica di mercato dei costruttori di display a schermo piatto, che fino ad ora non ha avuto l'evoluzione prevista anni addietro: i prezzi dei pannelli a schermo piatto non sono, infatti, crollati.

Inoltre, la tecnologia dei sistemi di compressione MPEG-2 continua a migliorare, anche se i risultati maggiori sono già stati ottenuti, e nuovi sistemi di codifica, notevolmente più efficienti, sono già stati sviluppati (MPEG-4) o sono in corso di definizione finale (H.26L). Ulteriori grandi miglioramenti saranno quindi possibili se i broadcaster riusciranno a definire politiche e modalità di migrazione verso questi nuovi sistemi di compressione.

Ad ogni modo, l'avvento della televisione digitale e dell'era dei display a schermo piatto potrà riservare molte appassionanti sorprese.

Ringraziamenti

Si ringraziano gli ingegneri e tecnici della Rai, BBC, ITVA, IRT, SVT ed EBU che hanno condotto gli studi descritti in questo articolo e la notevole assistenza fornita da molti costruttori.

CD3-OFDM:
una soluzione avanzata per i servizi DVB-T su rete isofrequenza

ing. Vittoria **Mignone**,
ing. Alberto **Morello**,
ing. Bruno **Sacco**,
ing. Michele **Visintin**

Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Torino

Sommario

L'articolo descrive l'algoritmo CD3-OFDM (Coded Decision Directed Demodulation - Orthogonal Frequency Division Multiplexing), sviluppato da Rai-CRIT per migliorare la copertura delle reti digitali televisive terrestri (DVB-T) a singola frequenza (SFN, Single Frequency Network), attraverso l'equalizzazione in ampiezza e fase del segnale OFDM ricevuto via etere. Le relative prestazioni, valutate con simulazioni al calcolatore, prove di laboratorio ed in area di servizio, utilizzando un prototipo di ricevitore CD3-OFDM sviluppato da Rai-CRIT, ne evidenziano le potenzialità ed i vantaggi rispetto ai ricevitori convenzionali. Ciò consente di estendere l'area di copertura e la disponibilità del servizio sulle reti SFN, in modo particolare in condizioni critiche di ricezione, come risulta nei seguenti casi: impiego di antenne omnidirezionali nei ricevitori portatili, configurazioni di trasmissione DVB-T a capacità elevata (ad esempio 64QAM 2/3) e distanze elevate tra i trasmettitori della rete.

1. Introduzione

Nella fase di definizione dei requisiti commerciali del sistema per la diffusione digitale televisiva terrestre DVB-T [1], grande importanza è stata data alla possibilità di operare su reti a singola frequenza (SFN, *Single Frequency Network*); ciò consente un grande risparmio di risorse di banda per i servizi a larga copertura (regionale e nazionale). Per un programma televisivo analogico a copertura nazionale sono infatti normalmente richiesti dai 5 ai 10 canali a radiofrequenza [2]. La possibilità del DVB-T di trasmettere sulla stessa frequenza su grandi aree geografiche, acquista quindi un notevole valore strategico in quanto consente di liberare molti canali da destinare ad altri servizi, permettendo il riordino delle frequenze dedicate ai servizi di radiodiffusione terrestre nelle bande VHF e UHF [3].

Nella scelta dello schema di modulazione da adottare, tra le classiche modulazioni a singola portante, adottate ad esempio nella diffusione digitale terrestre statunitense ATSC [4], e le più recenti modulazioni multiportante OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [5], [6], [7], già utilizzate nel sistema per la radiofonia digitale DAB [8], la scelta è caduta proprio sull'OFDM, in quanto più adatto ad un funzionamento in presenza di echi con ritardi elevati, quali sono quelli introdotti dai vari trasmettitori di una rete SFN.

I parametri definiti dallo standard DVB-T sono tali per cui il ricevitore convenzionale riesce ad equalizzare tutti gli echi che giungono al ricevitore in una finestra temporale (intervallo di guardia) al massimo di 224 ms [2]; ciò corrisponde ad una differenza di cammino fra le varie componenti del segnale ricevuto di circa 67,2 km. Questo permette di fronteggiare sufficientemente bene gli echi provenienti dai trasmettitori adiacenti al trasmettitore principale, ma non da quelli più lontani (di seconda fascia), come verificato in [2]. Tali echi si comportano quindi come segnali interferenti che degradano sensibilmente la qualità di ricezione e determinano una notevole riduzione della copertura dell'area di servizio, ben al di sotto dei livelli definiti dai criteri di pianificazione.

Per poter garantire il servizio in SFN anche nelle aree più sfavorevoli, il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai ha proposto e sviluppato un sistema di equalizzazione avanzato, da integrarsi nel ricevitore DVB-T, in grado di garantire la corretta ricezione anche in presenza di echi significativi al di fuori dell'intervallo di guardia. Il sistema si basa sull'algoritmo CD3-OFDM [Nota 1] (Coded Decision Directed Demodulation – OFDM), per

Nota 1.
Brevetto del Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai.

l'equalizzazione in ampiezza e fase di sistemi OFDM [9] [10] [11]. Grazie ad un anello retroazionato in cui i segnali ricevuti (componente principale ed echi) vengono demodulati e corretti dal codice correttore FEC (*Forward Error Correction*) presente nella catena, l'algoritmo stima la funzione di trasferimento del canale di trasmissione per ogni portante dello spettro del segnale OFDM (2K o 8K previsti dallo standard DVB-T); l'algoritmo non necessita di filtri interpolatori di frequenza né della trasmissione di portanti di riferimento all'interno dello spettro. Inoltre, è totalmente trasparente allo standard di trasmissione DVB-T.

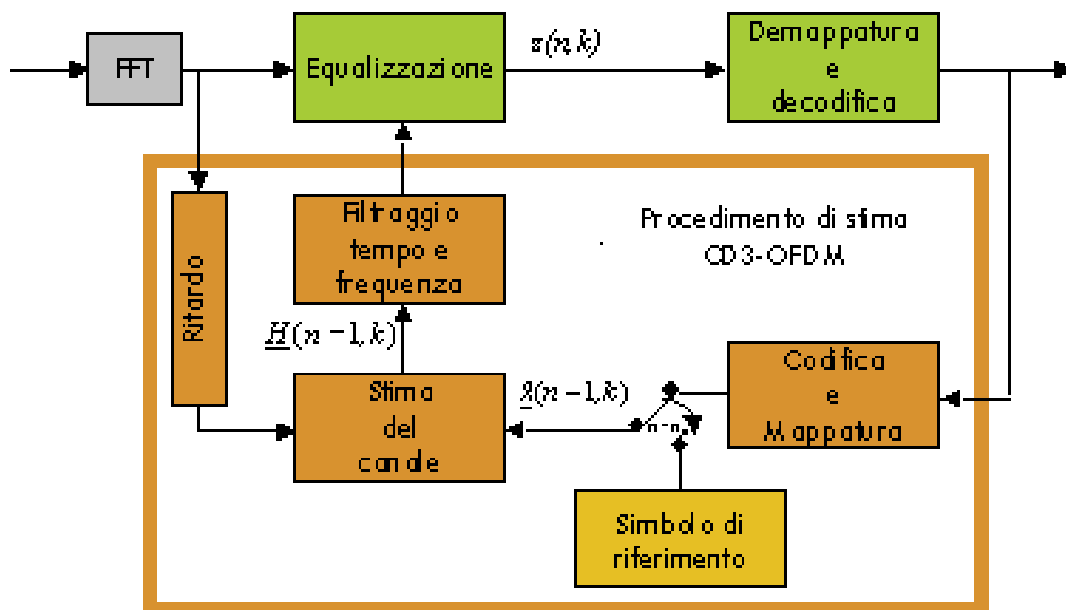
L'algoritmo CD3-OFDM, proposto dal Centro Ricerche Rai durante la fase di elaborazione della specifica DVB-T, avrebbe consentito inoltre un aumento della capacità trasmissiva (di circa l'8%) grazie alla possibilità di eliminare le portanti pilota di riferimento sparse nel segnale DVB-T trasmesso [2], che sono invece indispensabili per consentire l'equalizzazione del segnale nei ricevitori convenzionali. L'impiego delle portanti pilota è stato mantenuto nello standard DVB-T definitivo. Tuttavia le peculiarità della soluzione CD3-OFDM si sono rivelate significative essenzialmente in due condizioni:

- per aumentare la copertura del territorio nel caso di grandi reti a singola frequenza caratterizzate da echi con ritardi molto lunghi (direttamente legate alla distanza tra i trasmettitori) oppure, in alternativa,
- per ridurre il numero degli impianti trasmittenti su una determinata area di copertura.

Il ricevitore CD3-OFDM è caratterizzato infatti da prestazioni elevate anche in presenza di echi fuori dall'intervallo di guardia il cui effetto è di determinare un degradamento graduale delle prestazioni con l'aumentare del ritardo dell'eco [11] [12]; ciò porta ad aumentare la reiezione del ricevitore all'auto-interferenza di rete dovuta ai trasmettitori più distanti, consentendo di operare con rapporto di protezione cocanale C/I significativamente inferiore di quello richiesto dai ricevitori convenzionali. I ricevitori convenzionali subiscono invece un degradamento rapido delle prestazioni in presenza di echi fuori dall'intervallo di guardia, che può essere contenuto solo a prezzo di ridurre significativamente la distanza tra i trasmettitori della rete, la cui diretta conseguenza è di aumentare il numero dei trasmettitori a parità di area servita.

2. I principi della demodulazione CD3-OFDM

Come per un ricevitore convenzionale, un ricevitore basato sull'algoritmo CD3-OFDM, necessita di equalizzare le distorsioni introdotte dal canale per poter demodulare correttamente le costellazioni su ciascuna portante dati del simbolo OFDM ricevuto. Anziché effettuare la stima mediante le portanti pilota inserite nel simbolo OFDM, il ricevitore CD3-OFDM sfrutta il segnale OFDM ricevuto al simbolo precedente, demodulato e corretto dai potenti codici correttori inseriti nella catena di trasmissione. Il principio di funzionamento del ricevitore CD3-OFDM è rappresentato in figura 1, e si basa su di un anello retroreazionato di elaborazione dei simboli ricevuti. Data la periodica inserzione di un simbolo noto nella trama OFDM, il ricevitore CD3-OFDM effettua la stima della funzione di trasferimento del canale, come rapporto, portante per portante, tra il segnale ricevuto dopo trasformata FFT ed il valore noto del segnale trasmesso. Supponendo che il canale di trasmissione evolva lentamente nel tempo, la funzione di trasferimento del canale stimata viene poi utilizzata dal ricevitore CD3-OFDM per equalizzare il simbolo OFDM successivo. Da questo punto in poi è il segnale ricevuto che, dopo equalizzazione, demodulazione e correzione d'errore, viene rimodulato e codificato e svolge la funzione di segnale di riferimento, per la stima della funzione di trasferimento del canale relativa al simbolo successivo. Tale segnale non è privo di rumore e di errori (il tasso d'errore sul bit nel punto operativo del dispositivo è normalmente dell'ordine di 10^{-2} sul canale, e viene riportato a circa 10^{-4} dopo correzione da parte del decodificatore di Viterbi), ma il processo di filtraggio nel dominio del tempo e della frequenza, effettuato sulla funzione

Fig. 1 - Schema base del ricevitore CD3-OFDM

di trasferimento del canale stimata, permette di mitigare sia il livello di rumore che i picchi dovuti ad errori non corretti. Ovviamente, tanto più saranno strette le bande dei filtri, tanto più lento sarà il processo di inseguimento delle variazioni del canale nel tempo (effetto di una riduzione della larghezza di banda del filtro nel dominio del tempo) e tanto minore sarà l'intervallo di corretta equalizzazione T_f (effetto di una riduzione della larghezza di banda del filtro nel dominio della frequenza), che in assenza di filtraggio sarebbe pari a tutto il simbolo utile OFDM T_u. Accettando di equalizzare echi con ritardo fino a metà della durata del simbolo utile $T_u/2$ (ciò raddoppia comunque il massimo ritardo d'eco equalizzabile rispetto al ricevitore convenzionale), si riduce la componente di rumore sulla funzione di trasferimento del canale di 3 dB. Un ulteriore filtraggio nel dominio del tempo, che media su due campioni temporalmente consecutivi potrà ulteriormente ridurre il contributo di rumore sulla stima della funzione di trasferimento del canale, facendo tendere le prestazioni C/N del sistema al caso della demodulazione coerente ideale. Corrispondentemente il tempo di coerenza richiesto alle variazioni del canale di trasmissione passa da un simbolo OFDM, come nel caso della demodulazione differenziale, a due, rallentando la velocità di inseguimento di un eventuale effetto Doppler.In Appendice A è illustrato in modo dettagliato l'algoritmo CD3-OFDM.

Per adattare l'algoritmo al sistema DVB-T, che non prevede la trasmissione periodica di un simbolo di riferimento, è stato sviluppato un algoritmo di aggancio iniziale[Nota 1] in base alle portanti di riferimento inserite nel simbolo DVB-T. L'algoritmo, descritto in dettaglio in Appendice B, effettua una prima stima della funzione di trasferimento del canale utilizzando tali portanti di riferimento; nel caso siano presenti echi al di fuori dell'intervallo di guardia e quindi tale stima non risulti corretta, viene attivata una seconda fase di inizializzazione più lenta, che attraverso un'operazione di media temporale sulle portanti dati, effettuata su un numero elevato (40¸50) di simboli OFDM, permette di stimare la funzione di trasferimento per tutte le portanti dello spettro OFDM (come schematicamente illustrato in figura 2).

Simulazioni al calcolatore hanno dimostrato che, per il sistema 64QAM 2/3 con FFT su 8K punti, l'aggancio è possibile con scostamenti Doppler fino a 0,5 Hz per un eco da 0 dB e ritardo Tg. Raggiunto l'aggancio la velocità d'inseguimento del canale del ricevitore ritorna ad essere quella tipica del CD3-OFDM.

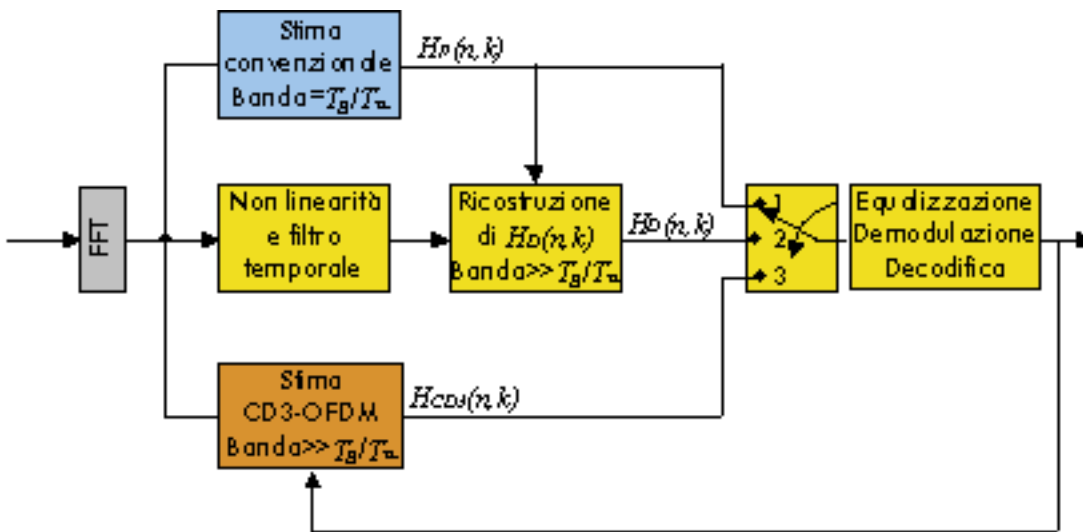



Fig. 2 - Procedimento d'aggancio CD3-OFDM applicato al sistema DVB-T.

3. Valutazione al calcolatore delle prestazioni del sistema CD3-OFDM

Le prestazioni del CD3-OFDM applicato al sistema DVB-T sono state analizzate al calcolatore in presenza di varie combinazioni di echi fuori e dentro l'intervallo di guardia, con la seguente configurazione di trasmissione: FFT su 8K punti, intervallo di guardia $T_g = T_u/4$=224 ms, schemi di modulazione e codifica 64QAM 2/3, 16QAM 1/2 e QPSK 1/2. Si sono paragonati due tipi di ricevitore:

- convenzionale, basato per la stima della funzione di trasferimento del canale sulle portanti pilota, con banda passante del filtro in frequenza $T_f/T_u= T_g/T_u$;
- CD3-OFDM filtrato nel dominio del tempo e della frequenza, con banda passante del filtro in frequenza $T_f/T_u= 2T_g/T_u$ e filtro temporale che media su due campioni successivi.

Le prestazioni del ricevitore CD3-OFDM in presenza di soli echi interni all'intervallo di guardia si sono rivelate leggermente migliori rispetto a quelle di un ricevitore convenzionale (0,5 dB rispetto al metodo di stima 2-D, 1 dB rispetto al metodo 1-D [2]), grazie alla maggiore capacità di filtrare il rumore sulla stima della funzione di trasferimento del canale.

I risultati riportati in figura 3 si riferiscono alla configurazione 64QAM 2/3 e ad un canale con un eco a 0 dB e ritardo Tg ed un secondo con ritardo variabile □. Le curve riportano il valore del massimo livello di interferenza (G [dB], rapporto tra la potenza del segnale utile e l'interferenza) al variare del ritardo normalizzato dell'eco □/Tg, tale da garantire un tasso d'errore sul bit (BER, Bit Error Rate) di 2×10-4 dopo la decodifica di Viterbi [Nota 2] in assenza di rumore. Come riferimento è anche riportata la curva relativa al "ricevitore ideale a degradamento progressivo delle prestazioni" [Nota 3],

Nota 2. Tale valore corrisponde a meno di un errore per ora di trasmissione all'uscita del demultiplatore MPEG-2, definito come qualità dell'immagine quasi immune da errori (QEF, Quasi Error Free).

Fig. 3 - Massimo livello d'eco per avere un BER di 2×10-4 dopo decodifica di Viterbi in assenza di rumore per la configurazione 64QAM 2/3

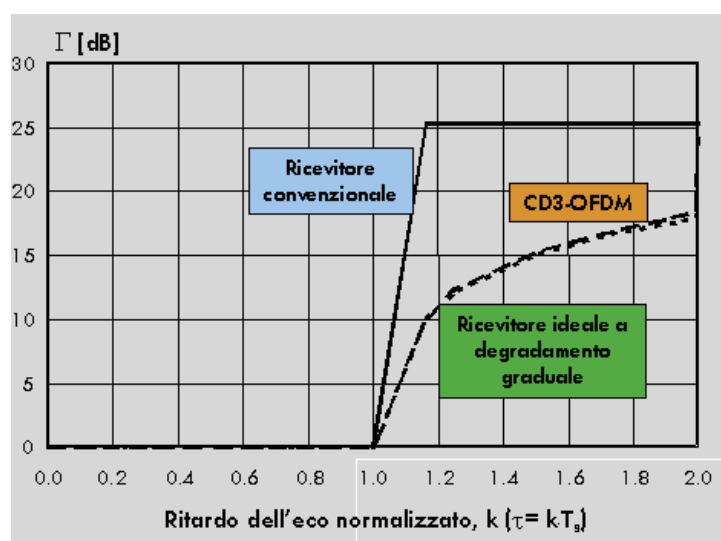
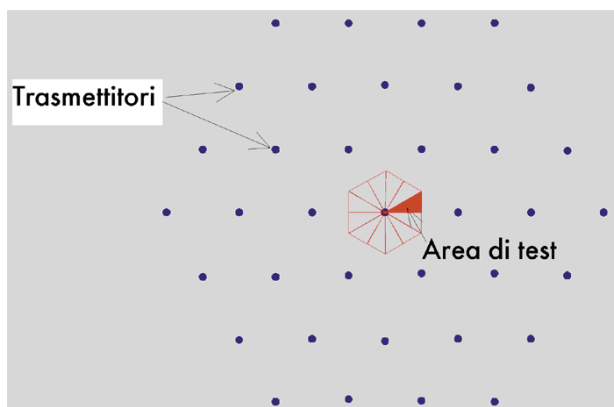



Fig. 4 - Configurazione di trasmettitori in SFN regolare

in grado di equalizzare correttamente tutti gli echi con ritardo minori della durata del simbolo OFDM (definito secondo il modello matematico descritto in [2], con $T_f = T_u + T_g$).

Il tempo di convergenza dell'algoritmo di aggancio è normalmente dell'ordine di 10¸20 simboli OFDM, 40 nei casi più critici.

Ulteriori simulazioni con i sistemi 16QAM 1/2 e QPSK 1/2 hanno dimostrato come il CD3-OFDM approssimi bene il "ricevitore ideale a degradamento graduale" se □ è maggiore di 3¸4 dB, valore che rappresenta il massimo livello d'eco al di fuori dell'intervallo di guardia in grado di permettere l'aggancio (in particolare il recupero dell'ambiguità di fase di π/2, come illustrato in appendice). Da notare comunque come nel caso della configurazione QPSK 1/2, l'aggancio viene sempre raggiunto nella Fase 1 del procedimento, grazie alla sua maggiore robustezza a rumore o disturbi sulla costellazione.

4. Miglioramento della copertura in reti a singola frequenza

Per valutarne i vantaggi offerti dai ricevitori CD3-OFDM rispetto a quelli convenzionali ottenibili con equalizzazione basata sulle sole portanti pilota in termini di coperture di servizio, sono stati effettuati alcuni esercizi di pianificazione. La struttura di rete considerata è la griglia esagonale con 37 trasmettitori a distanza D dagli adiacenti, dotati di antenne omnidirezionali poste a 300 metri di altezza. Si è applicato il modello probabilistico della Raccomandazione ITU-R 370 per la propagazione terrestre nella banda UHF relativo al 50% del tempo per i contributi di segnali interni all'intervallo di guardia e 1% per gli altri, entrambi con distribuzione log-normale del campo nelle locazioni dell'area di servizio e deviazione standard di 5,5 dB. Data l'elevata simmetria della struttura si è valutata la probabilità minima di copertura solo su una piccola porzione (colorata in rosso in figura 4) dell'area totale.

Le coperture sono state calcolate sia nel caso di ricezione fissa, con antenna direzionale posta a 10 m d'altezza[Nota 4], e ricezione portatile in ambiente esterno con antenna omnidirezionale posta a 1,5 m di altezza[Nota 5].

I ricevitori DVB-T disponibili in commercio operano strategie di sincronizzazione e posizionamento della finestra temporale del ricevitore diverse [13]: nello studio qui presentato

Nota 3.
Per il ricevitore ideale "a degradamento graduale" la potenza di tutti gli echi ricevuti entro una finestra di durata Tg è utile, e contribuisce positivamente alla potenza di segnale globale disponibile al ricevitore. Al di fuori dell'intervallo di guardia, una parte della potenza dell'eco, decrescente con aumentare del ritardo dell'eco, è associata allo stesso simbolo OFDM del segnale a ritardo nullo, e pertanto contribuisce positivamente alla potenza globale del segnale utile; un'altra parte di potenza dell'eco, crescente con aumentare del ritardo dell'eco, è associata al simbolo OFDM precedente e produce interferenza d'intersimbolo (ISI), che ha un effetto simile a rumore Gaussiano scorrelato. In aggiunta all'ISI, vi è una perdita di ortogonalità nelle portanti OFDM, indotta dagli echi al di fuori di Tg, che producono ICI (Inter-Carrier Interference). Pertanto, aumentando progressivamente il ritardo dell'eco al di fuori di Tg, il contributo utile C decresce e l'interferenza ISI-ICI I aumenta con legge quadratica.

Nota 4.
Con guadagno di 10 dB fino a 20°, decrescente linearmente fino a -6 dB a ±60° e fattore fronte-retro di 16 dB.

Nota 5.
Si è posto il fattore di conversione d'altezza da 10 m a 1,5 m a 12 dB.

si è considerato il caso più favorevole, in cui la finestra viene posizionata in modo da massimizzare la potenza utile totale rispetto alla potenza interferente.

Nelle valutazioni si sono analizzate diverse configurazioni di trasmissione, tutte basate su FFT su 8K punti e intervallo di guardia T_g = 224 ms, tipici per trasmissione su rete a singola frequenza. Si sono paragonati le coperture ottenute per i due tipi di ricevitore descritti nella sezione 3.

Per tutte le 15 configurazioni di modulazione e codifica non gerarchiche della norma DVB-T, si è valutata l'autointerferenza della rete SFN in assenza di rumore, in termini della probabilità di copertura minima ottenibile dell'area di servizio. Come illustrato in figura 5, dove la distanza tra i trasmettitori è di 60 Km, il ricevitore CD3-OFDM, grazie ad un intervallo di corretta equalizzazione T_f doppio rispetto al ricevitore convenzionale, consente di raggiungere coperture sensibilmente maggiori.

Ad esempio, in ricezione portatile un ricevitore convenzionale garantisce il 95% di copertura (livello definito in sede internazionale [14] come "buono") solo per le configurazioni QPSK-1/2 (5 Mbit/s) e QPSK-2/3 (6,6 Mbit/s), mentre con il ricevitore CD3-OFDM è possibile aumentare la capacità trasmissiva, a parità di copertura del servizio, anche fino a 15 Mbit/s circa, mediante le configurazioni di trasmissione utilizzanti 16QAM-3/4 (15 Mbit/s) e 64QAM-1/2 (15 Mbit/s); in pratica la ricezione tramite un ricevitore CD3-OFDM nelle aree più critiche consente di aumentare la capacità trasmissiva del canale di più del doppio. Inoltre la copertura portatile si mantiene "accettabile" (probabilità di copertura minima del 70%, [14]) anche fino alla configurazione 64QAM-3/4, che trasporta più di 22 Mbit/s. Per quanto riguarda la ricezione fissa il ricevitore convenzionale è limitato a 17 Mbit/s (16QAM-5/6) per una "buona" copertura, mentre il ricevitore CD3-OFDM consente di operare con tutte le configurazioni dello standard DVB-T anche in condizioni critiche di ricezione.

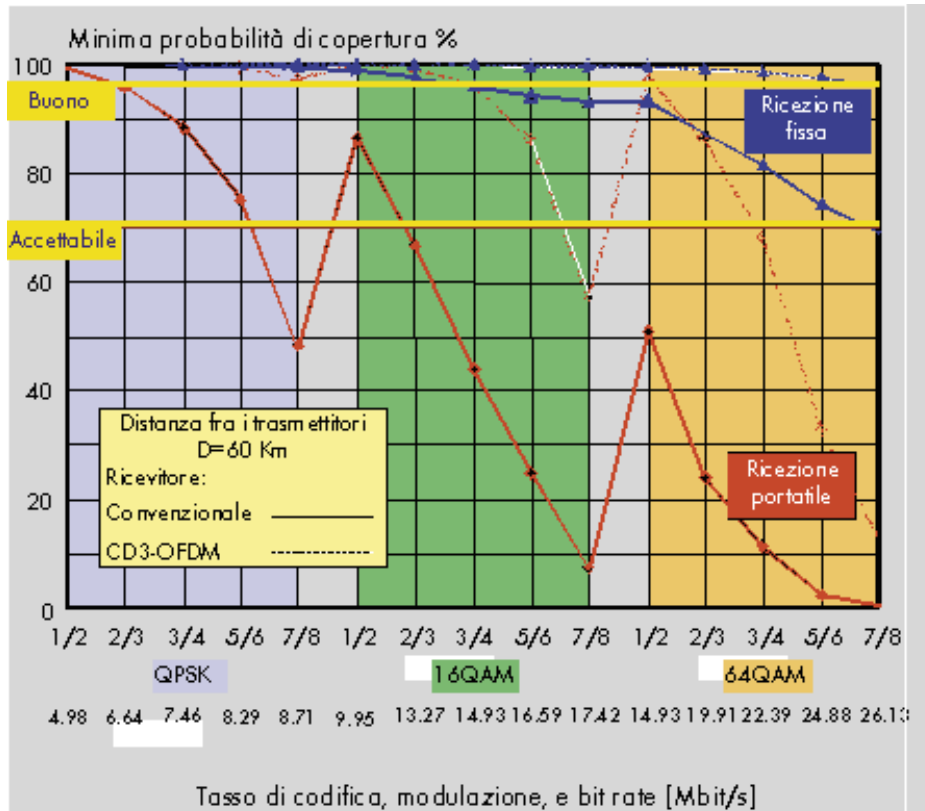



Fig. 5 - Probabilità di copertura minima per il ricevitore CD3-OFDM paragonata a quella ottenibile con un ricevitore convenzionale.

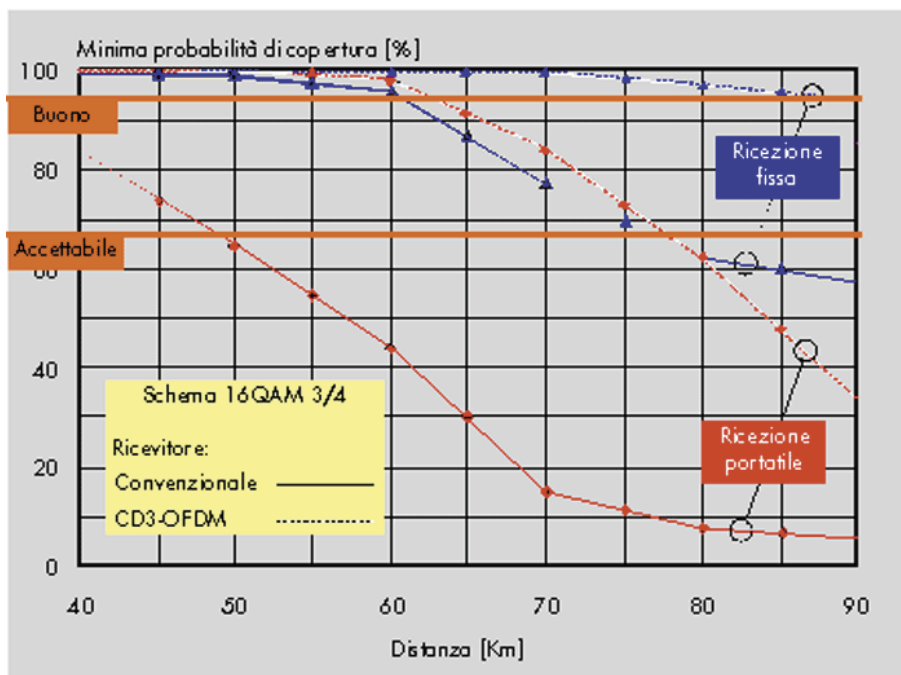
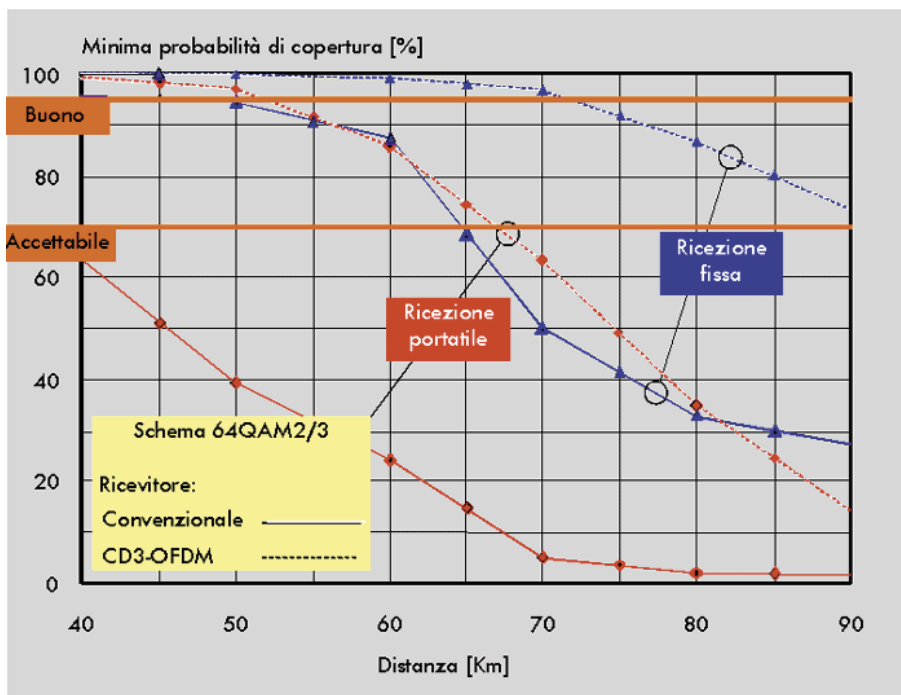
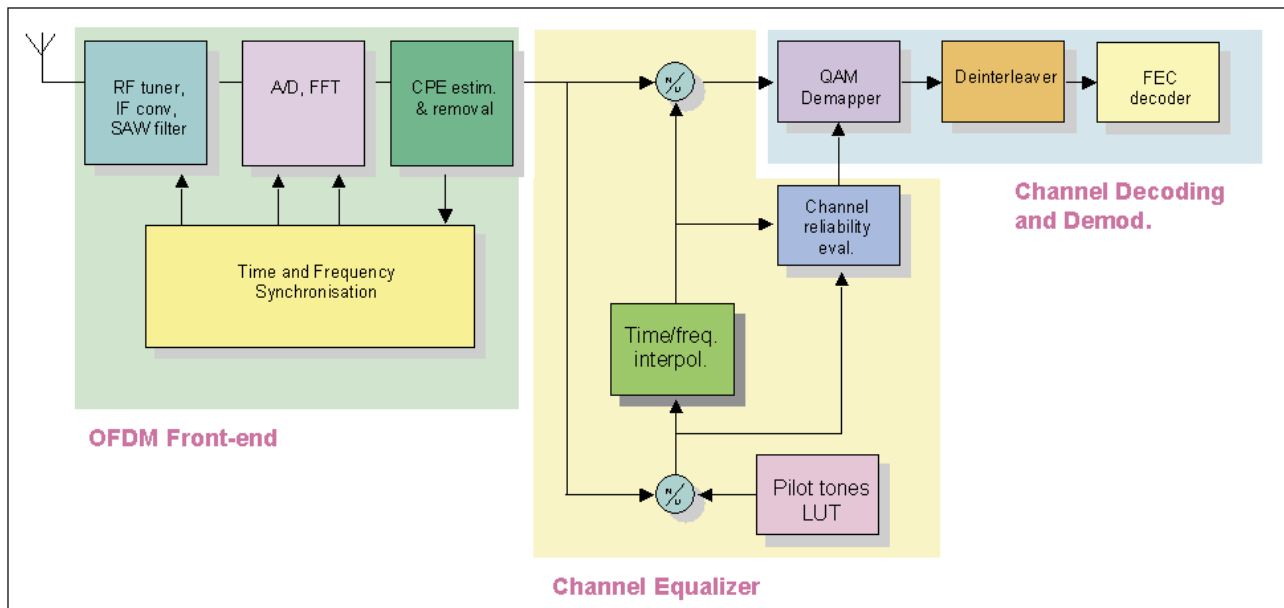



Fig. 6 - Probabilità di copertura minima per il ricevitore convenzionale e CD3-OFDM in funzione della distanza tra i trasmettitori per la configurazione 16QAM 3/4 (Bit rate Ru = 15 Mbit/s)

Fig. 7 - Probabilità di copertura minima per il ricevitore convenzionale e CD3-OFDM in funzione della distanza tra i trasmettitori per la configurazione 64QAM 2/3 (Bit rate Ru = 20 Mbit/s).

Nelle figura 6 e 7 è invece analizzato, rispettivamente, il comportamento del ricevitore convenzionale e CD3-OFDM per gli schemi 16QAM-3/4 (15 Mbit/s) e 64QAM-2/3 (20 Mbit/s), al variare della distanza tra i trasmettitori della rete. I risultati indicano che il sistema CD3-OFDM permette di aumentare del 20¸50 % la distanza tra i trasmettitori della rete, a parità di copertura percentuale. Per esempio in figura 6 si può vedere come il ricevitore CD3-OFDM garantisca una buona copertura a 15 Mbit/s (16QAM 3/4) con una distanza tra i trasmettitori adiacenti di circa 60 Km, mentre con ricevitori convenzionale al massimo si può arrivare a 35 km. Analogamente in figura 7, relativa al 64 QAM-2/3 (20 Mbit/s) si passa da 72 km per una buona copertura con il CD3-OFDM a 50 km per i ricevitori convenzionali. Dato che il quadrato della distanza è inversamente proporzionale al numero di trasmettitori nella rete (per reti regolari molto grandi), si può dedurre come ricevitori di tipo CD3-OFDM potenzialmente permettano, tenendo conto delle sole autointerferenze di rete, di ridurre alla metà o addirittura ad un terzo il numero di trasmettitori nella rete SFN rispetto ai ricevitori DVB-T convenzionali, a parità di area di copertura.

Sono state effettuate ulteriori simulazioni in presenza di rumore, verificando che il guadagno dato dal CD3-OFDM si mantiene fintanto che la potenza non diventa il limite alla copertura del servizio.

Fig. 8 - Struttura di un ricevitore DVB-T convenzionale

5. Implementazione hardware del ricevitore CD3-OFDM

L'algoritmo di stima di canale CD3-OFDM è stato realizzato in hardware come prototipo sperimentale, mediante componenti FPGA e DSP; la scheda CD3-OFDM è stata interfacciata al dimostratore europeo dTTb [13] (il primo ricevitore a standard DVB-T), sostituendo l'equalizzatore esistente. La configurazione implementata ha un filtro nel dominio della frequenza con una "banda" $T_f/T_u = 2T_g/T_u$ ed un filtro nel dominio del tempo, mediato su due simboli successivi.

Le prove di laboratorio sul ricevitore CD3-OFDM prototipale hanno verificato la validità dei risultati delle simulazioni riguardanti il degradamento graduale con echi aventi ritardo superiore alla durata dell'intervallo di guardia ed in presenza di effetto Doppler.

5.1 Architettura del ricevitore CD3-OFDM

Il ricevitore DVB-T convenzionale è schematizzato in figura 8. La prima sezione, indicata come "OFDM front-end", comprende tutte le funzioni di conversione del segnale ricevuto dall'antenna al simbolo OFDM (dopo FFT).

La sezione seguente, "Channel Equaliser", stima la risposta del canale tramite una divisione complessa fra le portanti pilota in arrivo e quelle memorizzate in una tabella ("*Look up table*", LUT) ed esegue un'interpolazione tempo-frequenza del risultato. Il divisore complesso in alto nella figura è l'equalizzatore che ha il compito di ripristinare ampiezze e fasi di tutte le costellazioni OFDM. Un ulteriore blocco effettua la stima dell'affidabilità del canale, utilizzata per ottimizzare le prestazioni della decodifica di Viterbi, stimando il rapporto segnale rumore C/N su ciascuna portante. C è sostanzialmente il modulo al quadrato della risposta del canale; la stima di N richiede, frequenza per frequenza, una media a lungo termine di rumore e interferenze. Siccome la componente N può essere estratta solo se noto il segnale trasmesso, questa operazione è fatta solo sulle portanti pilota e il risultato è interpolato nel dominio della frequenza per ricostruire i campioni mancanti.

L'ultimo blocco è il demodulatore con relativo decodificatore di canale, alimentato dai vettori equalizzati e dai coefficienti della stima dell'affidabilità del canale. Tali segnali sono utilizzati per calcolare le metriche all'interno dell'algoritmo di Viterbi.

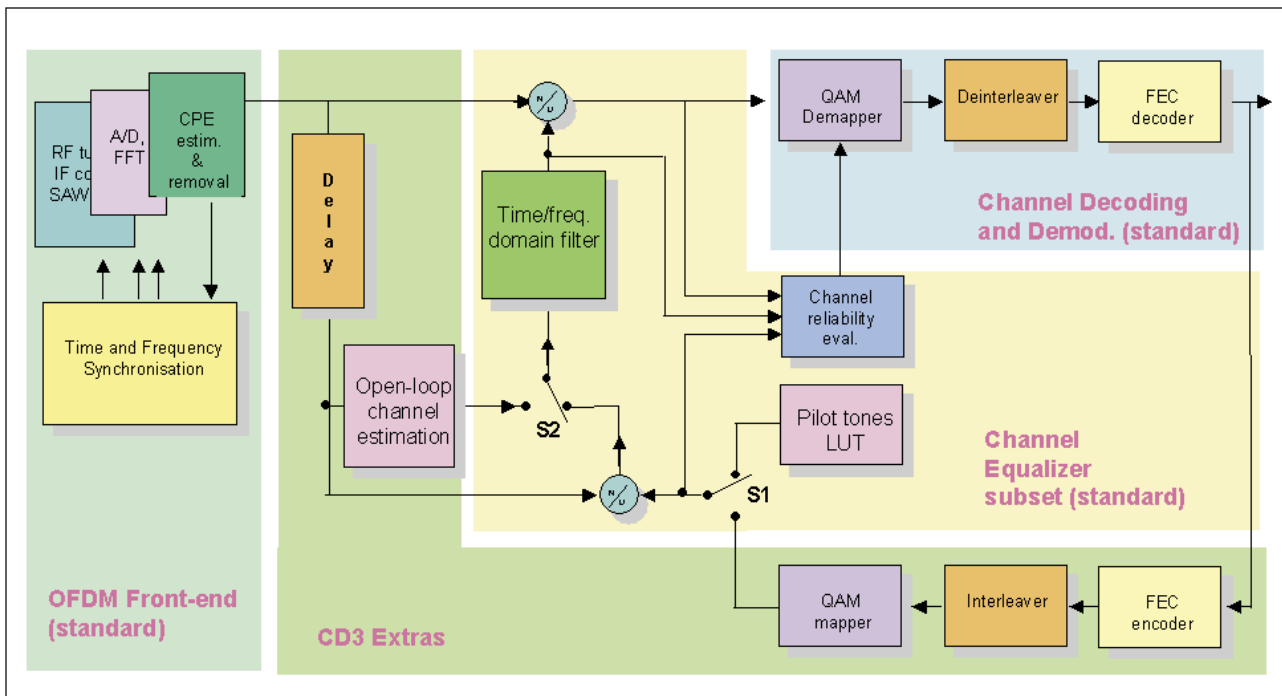



Fig. 9 - Struttura del ricevitore CD3-DVB-T

L'architettura del ricevitore CD3 può essere vista come l'estensione del ricevitore convenzionale come si può facilmente verificare in figura 9. La prima sezione ("OFDM front end") e l'ultima ("Channel Decoding and Demodulation") sono identiche a quelle del ricevitore convenzionale.

L'equalizzatore di canale è costituito dai medesimi blocchi funzionali, benché essi siano usati in modo leggermente diverso.

L'introduzione del CD3-OFDM richiede l'inserimento d'alcuni nuovi blocchi hardware. Nel ramo di reazione, il "FEC encoder" e il "QAM mapper" sono costituiti da semplice logica combinatoria e sequenziale. L'"Interleaver" richiede una memoria di simbolo oltre ad una logica di generazione degli indirizzi. Questo blocco è simile al Deinterleaver che precede il FEC Decoder ma più semplice poiché ogni posizione di memoria è costituita da soli tre bit anziché nove (parallelismo 3). Il blocco "Delay" è una memoria di simbolo di tipo FIFO a 24 bit. Il blocco "Open-loop Channel estimation" [15] richiede una memoria di simbolo di tipo FIFO per calcolare la media. Il parallelismo adottato è di 22 bit per asse. Sono inoltre necessari blocchi in grado di svolgere operazioni aritmetiche (accumulatori, tabelle, ecc.).

La velocità di calcolo necessaria è analoga a quella del ricevitore convenzionale. L'equalizzazione del simbolo n è basata sulla stima della risposta del canale effettuata sul simbolo n-1. Tutte le operazioni sono eseguite ad una frequenza di clock di 18 MHz eccetto quelle riguardanti il Viterbi decoder seriale operante a 36 MHz. Benché questa velocità sia facilmente ottenibile dall'attuale tecnologia, il funzionamento a frequenze inferiori (ad esempio la metà) è anche possibile ma a costo di una minor velocità d'adattamento al canale tempo-variante. Nel prototipo, è stata adottata la massima velocità d'anello, per rendere massime le prestazioni in presenza di Doppler shift.

In linea di principio sarebbe anche possibile scegliere l'approccio inverso, aumentando la velocità del clock e diminuendo le risorse hardware; di fatto tale soluzione non è conveniente essendo il costo dell'hardware aggiuntivo irrisorio.

5.2 Test di laboratorio sul ricevitore CD3-OFDM

Misure in presenza di echi fuori dall'intervallo di guardia

Le prestazioni del ricevitore CD3-OFDM prototipale sono state valutate nei laboratori Rai-CRIT utilizzando il simulatore di canale (Multipath Channel Simulator), con e senza l'aggiunta di rumore gaussiano additivo (AWGN, Additive White Gaussian Noise). Il simulatore di canale utilizzato permette di inserire echi con ritardo fino a 2 x 190 µs (circa 1,7T_g). Non è stato possibile quindi estendere la prova fino al limite teorico di 2 T_g. Durante i test sono stati monitorati lo spettro, la costellazione e la risposta in frequenza del canale.

Le prestazioni del ricevitore CD3 sono state confrontate con un ricevitore convenzionale di classe professionale ottenendo i seguenti risultati:

- Su canale AWGN, per raggiungere un BER dopo decodifica di Viterbi pari a $2 \cdot 10^{-4}$, il prototipo CD3-OFDM richiede 18,8 dB di C/N contro i 19,4 dB richiesti dal ricevitore convenzionale. Questo leggero miglioramento (0,6 dB) è dovuto al miglior filtraggio della stima di canale nel dominio del tempo consentito dall'algoritmo CD3;
- Sommando un singolo eco con ritardo eccedente l'intervallo di guardia (□Î[T_g,2T_g]), il CD3-OFDM ha dimostrato un degradamento graduale secondo quanto previsto dalla teoria. La figura 10 confronta le prestazioni del prototipo CD3-OFDM con quelle del ricevitore convenzionale in termini di C/I dell'eco per ottenere un BER pari a $2 \cdot 10^{-4}$ dopo decodifica di Viterbi senza rumore. Nella regione da 1,2 T_g (270 µs) a 1,5 T_g (340 µs), il guadagno del CD3-OFDM, in termini di rapporti di protezione, è dell'ordine di 9-10 dB, e a 1,7 T_g (380 µs) è di circa 7 dB.

Misure in presenza di scostamenti Doppler

Dal momento che il CD3-OFDM è stato principalmente ideato per migliorare la probabilità di corretta ricezione portatile e fissa in SFN, solo il modo 8k, 64QAM 2/3 con intervallo di guardia Tg=1/4Tu è stato implementato nel prototipo. Ovviamente questo modo non è adatto per la ricezione mobile [2], [15], tuttavia sono state fatte delle prove comparative con il ricevitore convenzionale per estrapolare delle indicazioni inerenti al comportamento del CD3-OFDM in ricezione mobile.

Il sistema è stato testato con i seguenti profili di canale con echi:

Eco singolo:

- Ritardo τ=0 per il segnale principale, 0.9T_g per l'eco;
- Scostamento Doppler: 0 per il segnale principale, 2f_d per l'eco;
- Attenuazione dell'eco rispetto al segnale principale: 0, 3, 5 and 10 dB;

Echi multipli:

- Ritardi: τ=0 per il segnale principale, T_g/4, T_g/3, 2T_g/3, per gli echi;
- Scostamento Doppler: +f_d per il segnale principale, -f_d, +f_d, -f_d per gli echi;
- Attenuazione degli echi rispetto al segnale principale pari a 4,77, 8.77 dB (corrispondente ad un C/I totale di 4 dB) and 14.77 dB (corrispondente ad un C/I totale di 10 dB).

Lo scopo di questi profili è la valutazione del degradamento delle prestazioni dovute esclusivamente all'effetto Doppler, senza il contributo del fading piatto.

Definendo come C/I il rapporto fra la potenza del raggio principale e la somma della potenza di tutti gli altri echi, i risultati sui profili utilizzati

Fig. 10 - Eco singolo fuori dall'intervallo di guardia: $2 \cdot 10^{-4}$: degradamento graduale delle prestazioni del prototipo CD3-OFDM rispetto al rapido degradamento del ricevitore convenzionale

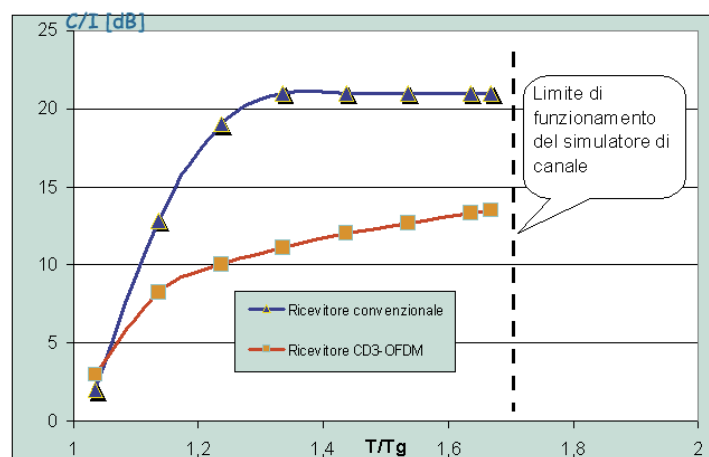
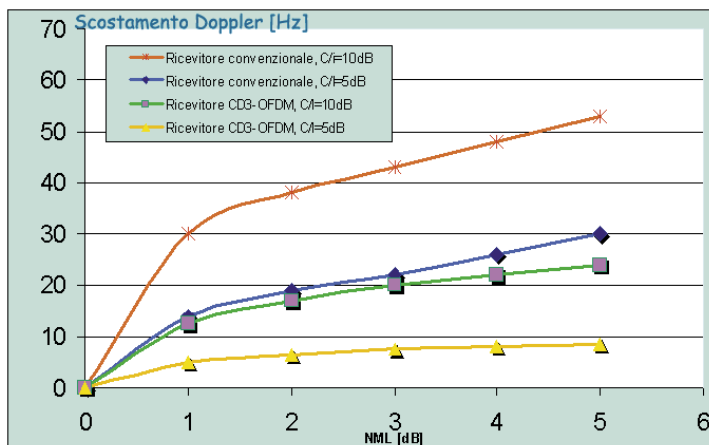



Fig. 11 - Scostamento Doppler che causa un dato NML (profilo con eco singolo)

hanno fornito il massimo scostamento Doppler accettabile per un dato degradamento delle prestazioni (NML, *Noise Margin Loss*). La soglia utilizzata è un BER dopo decodifica di Viterbi di 2×10^{-4}, corrispondente al livello QEF all'uscita del demultiplatore MPEG-2.

In figura 11 sono riportati i risultati per il caso di canale con eco singolo affetto da scostamento Doppler. Si è considerato il comportamento a regime del ricevitore CD3-OFDM, dopo la fase di aggancio. Come si può vedere dalla figura, il ricevitore CD3-OFDM sopporta approssimativamente uno scostamento Doppler dimezzato rispetto a quello permesso dal ricevitore convenzionale, dovuto alla presenza del filtro temporale, che media su due campioni consecutivi. A titolo di esempio, si considerano il canale 66 (834 MHz) ed il canale 28 (530 MHz), utilizzati attualmente da Rai-CRIT per la sperimentazione DVB-T a Torino. Accettando un degradamento di 1 dB, in presenza di un rapporto C/I di 10 dB il ricevitore convenzionale può funzionare fino a quasi 40 Km/h sul canale 66 e 61 sul canale 28, mentre il ricevitore CD3-OFDM può arrivare a soli 16 Km/h e 25 rispettivamente. Se il rapporto C/I scende a 5 dB, la massima velocità accettata scende a circa 17 Km/h sul canale 66 e 27 sul canale 28 per il ricevitore convenzionale e a 7 e 10 rispettivamente per il ricevitore CD3-OFDM.

In tutti gli altri casi (echi multipli affetti da scostamento Doppler), si è verificato un comportamento analogo [15].

6. Conclusioni

Attraverso l'invenzione del sistema di equalizzazione CD3-OFDM e la sua applicazione ai ricevitori DVB-T, Rai-CRIT ha dato un importante contributo alla definizione dello standard per la televisione digitale terrestre, offrendo la possibilità di garantire la copertura del servizio in SFN anche in aree critiche, in presenza di echi a potenza elevata che cadono fuori dall'intervallo di guardia.

Il procedimento CD3-OFDM per la stima della funzione di trasferimento del canale, valutato sia attraverso simulazioni al calcolatore che in laboratorio mediante il prototipo di ricevitore sviluppato dal Centro Ricerche della Rai, offre prestazioni analoghe ai ricevitori convenzionali DVB-T in presenza di soli echi che cadono all'interno dell'intervallo di guardia; per contro, offre benefici in termini di qualità del servizio in presenza di echi esterni all'intervallo di guardia. Diventa pertanto possibile la realizzazione di reti SFN a larga copertura (ad es. regionale o nazionale) senza dover incrementare significativamente il numero dei trasmettitori rispetto alla situazione dell'attuale servizio televisivo analogico, garantendo allo stesso tempo una elevata qualità del servizio.

Il prototipo hardware del ricevitore CD3-OFDM ha inoltre permesso una verifica comparativa della complessità dell'algoritmo di equalizzazione CD3-OFDM rispetto alle tecniche comunemente impiegate nei ricevitori convenzionali, ritenendola paragonabile, sia in termini delle velocità richieste, che in termini di memoria, senza aggravi sul costo del ricevitore d'utente.

I vantaggi della soluzione CD3-OFDM sono ottenibili con lo sviluppo di ricevitori commerciali DVB-T che includono tale algoritmo, senza tuttavia che si richiedano modifiche allo standard di trasmissione. L'opportunità offerta all'industria del settore e agli operatori di rete potrebbe costituire un importante incentivo nello sviluppo della televisione digitale terrestre, con particolare attenzione alle reti isofrequenziali a larga copertura.

Bibliografia

1. ETSI EN 300 744, " Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", http://www.etsi.org

2. V.Mignone, A.Morello, M.Visintin, "Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 1, 2002

3. M. Cominetti: "La televisione digitale terrestre: un'opportunità per il nostro paese", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 1, 2002

4. ATSC Standard A/53 (1995), "ATSC Digital Television Standard", http://www.atsc.org/standards/a_53b.pdf

5. S.B.Weinstein, and P.M. Ebert: "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform", IEEE Transaction on Communications, COM-19(5), p.628-634, October 1971

6. Cimini, "Analysis and simulation of a digital mobile channel using Orthogonal Frequency Division Multiplexing", IEEE Transaction on Communications, COM-33, p.665-675, July 1985

7. M. Alard, R. Lassalle: "Principles of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers", EBU Technical Review, n.224, p.168-190, August 1987

8. ETSI EN 300 401, "Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers", http://www.etsi.org

9. V. Mignone, A. Morello, "CD3-OFDM: a novel demodulation scheme for fixed and mobile receivers", IEEE Transactions on Communications, COM-44(9), pp. 1144 - 1151, September 1996

10. V. Mignone, A. Morello, M. Visintin, "CD3-OFDM: A new channel estimation method to improve the spectrum efficiency in digital terrestrial television systems", IBC'95, Amsterdam, 14-18 September, 1995

11. V. Mignone, A. Morello, M. Visintin, "Advanced algorithm for improving DVB-T coverage in SFN", IBC'97, Amsterdam

12. A. Morello, G. Blanchietti, C. Benzi, B. Sacco, M. Tabone "Performance assessment of a DVB-T television system", Montreux Symposium, 1997.

13. A.Bertella, B.Sacco, M.Tabone, "Valutazione in laboratorio del sistema DVB-T per la televisione digitale terrestre", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 1, 2002

Glossario	
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
CD3-OFDM	Coded Decision Directed Demodulation-OFDM
DAB	Digital Audio Broadcasting
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-T	DVB-Terrestrial
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FIFO	First In First Out
ISI	InterSymbol Interference
LUT	Look Up Table
NML	Noise Margin Loss
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QEF	Quasi Error Free
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
SFN	Single Frequency Network

14. European Broadcasting Union – “Terrestrial Digital Television planning and implementation considerations”, BNP 005 Second Issue, 1997.

15. A. Morello, B. Sacco, “Hardware architecture and laboratory test on an advanced CD3 DVB-T receiver”, IBC’99, Amsterdam.

Appendice A
I principi della demodulazione CD3-OFDM

Supponendo che il simbolo OFDM trasmesso al tempo n-1 sia noto, la funzione di trasferimento del canale di trasmissione potrà essere calcolata come rapporto tra il segnale ricevuto y(n-1,k) ed il segnale trasmesso x(n-1,k):

$$\hat{\underline{H}}(n-1,k) = \underline{y}(n-1,k)/\underline{x}(n-1,k) = \underline{H}(n-1,k) + \underline{g}(n-1,k) \quad (1)$$

dove $\underline{g}(n-1,k) = \underline{n}(n-1,k)/\underline{x}(n-1,k)$

rappresenta una componente di rumore gaussiano, che dipende anche dall’ampiezza del segnale trasmesso x(n-1,k).

Nell’ipotesi che la funzione di trasferimento del canale

sia quasi-stazionaria tra i due simboli n-1 e n, il simbolo successivo n potrà essere così equalizzato:

$$\underline{z}(n,k) = \underline{y}(n,k)/\hat{\underline{H}}(n-1,k) \approx \underline{x}(n,k) + \underline{\nu}(n,k) \quad (2)$$

La stima z(n,k) sarà affetta, come nella demodulazione differenziale[Nota 6], da un degradamento delle prestazioni di 3 dB rispetto alla demodulazione ideale, con riferimento non affetto da rumore. Ciò in quanto i campioni della stima della funzione di trasferimento del canale $\hat{\underline{H}}(n,k)$ sono altrettanto rumorosi del segnale y(n-1,k). Per ridurre il contributo di rumore sulla stima è però possibile introdurre un filtraggio in frequenza sulla stima di

$\hat{\underline{H}}(n,k)$ accettando una riduzione del cosiddetto intervallo di corretta equalizzazione Tf [2], che, essendo $\hat{\underline{H}}(n,k)$ campionata con frequenza unitaria (la funzione è disponibile per ogni posizione delle portanti, dati e pilota), si estende per il ricevitore CD3-OFDM in assenza di filtraggio a tutta la durata della porzione utile del simbolo OFDM Tu. Un ulteriore filtraggio nel dominio del tempo (tenendo conto delle limitazioni che ciò impone alla capacità di inseguire le variazioni del canale) potrà ulteriormente ridurre il contributo di rumore sulla stima della funzione di trasferimento del canale.

L’algoritmo CD3-OFDM originariamente proposto in [9] e [10] si basa sulla ritrasmissione periodica di un simbolo OFDM di riferimento per iniziare il processo di equalizzazione, che si riassume nei seguenti passi (figura 1):

1. Ricezione della sequenza di riferimento x(n=1,k);
2. Stima della funzione di trasferimento del canale $\hat{\underline{H}}(n=1,k)$ secondo la formula (1);
3. Filtraggio di $\hat{\underline{X}}(n,k)$ nel dominio della frequenza e del tempo;
4. Equalizzazione del simbolo C-OFDM al passo n mediante la formula (2);
5. Stima della sequenza trasmessa attraverso demodulazione e decodifica della sequenza z(n,k), e successiva ricodifica e rimodulazione per generare $\hat{\underline{X}}(n,k)$;
6. Ripetizione simbolo per simbolo del procedimento a partire dal passo 2, utilizzando come sequenza di riferimento la sequenza stimata al passo precedente $\hat{\underline{X}}(n,k)$.

Il procedimento CD3-OFDM rende inutile la trasmissione di portanti note all’interno del

Nota 6.
Da notare che questo metodo non è limitato alle costellazioni con simmetria rotazionale, come la demodulazione differenziale, ma è applicabile ad ogni costellazione.

simbolo OFDM, purché sia periodicamente trasmesso un simbolo noto per iniziare il processo di demodulazione CD3-OFDM. La stima della funzione di trasferimento del canale viene effettuata ad ogni simbolo OFDM, per essere applicata al simbolo successivo, permettendo una velocità di inseguimento del canale equivalente a quella dei sistemi differenziali.

Accorgimenti implementativi

Per le modulazioni ad inviluppo non costante, come il 16QAM ed il 64QAM, il livello del rumore $\underline{\varepsilon}(n,k)$ associato alla stima del canale cambia significativamente da campione a campione, introducendo un degradamento sulle prestazioni del sistema. Per ridurlo, quando la portante k-esima trasporta uno degli L punti più interni della costellazione, la k-esima posizione di $\hat{H}(n,k)$ viene mantenuta al valore stimato al simbolo precedente.

Il demodulatore CD3-OFDM potrebbe diventare instabile per alte probabilità d'errore sul canale, in quanto gli errori non corretti rientrano nell'anello di stima. Questo effetto è normalmente neutralizzato fino a probabilità d'errore molto elevate, grazie alla presenza di codici correttori potenti e al filtraggio della funzione $\hat{\underline{H}}(n,k)$, che attenua i picchi dovuti agli errori residui nell'anello di retroazione. La presenza poi di un interallacciatore di frequenza con regola di sparpagliamento delle portanti diversa per simboli consecutivi, permette di spezzare le lunghe sequenze d'errore all'uscita del decodificatore di Viterbi, ulteriormente aumentandone le capacità correttive.

Appendice B: L'algoritmo CD3-OFDM applicato ai ricevitori DVB-T

Il sistema DVB-T non prevede la trasmissione periodica di un simbolo di riferimento. Poiché in tale caso l'algoritmo CD3-OFDM originario non è in grado di iniziare il processo di stima, si è sviluppato un algoritmo di aggancio basato sulle portanti pilota trasmesse nel segnale DVB-T [11] e suddiviso nelle seguenti due fasi consecutive:

Fase 1. Si tenta un aggancio veloce (entro 4 simboli OFDM) dell'anello di stima CD3-OFDM mediante la stima convenzionale $\hat{\underline{H}}_P(n,k)$ della funzione di trasferimento del canale prevista dal sistema DVB-T, sulla base alle portati pilota sparse (con banda del filtro interpolatore $T'_f/T_u = T_g/T_u$). Nel caso di echi fuori dall'intervallo di guardia poco potenti l'anello raggiunge la stabilità e la demodulazione CD3-OFDM può continuare; in caso contrario si prosegue con la Fase 2.

Fase 2. L'ampiezza e la fase della funzione di trasferimento corrispondente alle portanti dati sono calcolate applicando una non-linearità (ad esempio elevazione alla quarta potenza) ed un filtro nel dominio del tempo (ad esempio la funzione media) su N simbolo OFDM consecutivi. L'ambiguità di fase di multipli di p/2, dovuta alla simmetria delle costellazioni M-QAM, viene risolta adottando portante per portante la fase più vicina a quella della stima ottenuta nella Fase 1[Nota 7]. Introducendo poi un filtro in frequenza con banda T_f/T_u uguale, ad esempio, a $2T_g/T_u$, si ottiene una stima della funzione di trasferimento del canale $\hat{H}_D(n,k)$ con cui è possibile equalizzare correttamente tutti gli echi fino a ritardo pari a due volte l'intervallo di guardia. Questa fase permette un aggancio lento del procedimento CD3-OFDM (necessita di alcune decine di simboli OFDM), per cui può essere applicata solo nel caso di canale quasi-statico per tutta la durata del periodo di aggancio.

Nota 7. Si ipotizza che gli echi fuori dall'intervallo di guardia siano limitati in ampiezza (attenuati di almeno 3-4 dB), e producano quindi rotazioni di fase addizionale piccole (< p/4) rispetto a quelle introdotte dagli echi minori dell'intervallo di guardia (stimate nella Fase 1).

Che cosa è, come funziona: *display a cristalli liquidi (LCD, DSTN, TFT)*

ricerca bibliografica e testo:
ing. Marzio **Barbero** e
ing. Natasha **Shpuza**

grafica 3D: ing. Mario **Muratori**

1. Premessa

Questa è la prima di una serie di "schede" intitolate "Che cosa è, come funziona". Tali "schede" hanno lo scopo di illustrare le tecnologie o i sistemi che sono normalmente oggetto degli articoli pubblicati su Elettronica e Telecomunicazioni, per fornire alcune informazioni di base che ne facilitino la lettura e comprensione.

Fra le tecnologie per realizzare gli schermi piatti o FPD (*Flat Panel Display*), quella basata sui cristalli liquidi ha avuto negli ultimi anni una rapida evoluzione in termini di prestazioni e dimensioni diventando la predominante nell'ambito informatico; più recentemente sono stati proposti anche televisori dotati di grande schermo a cristalli liquidi.

2. Cenni storici

Gli scienziati erano a conoscenza dell'esistenza dei cristalli liquidi fin dalla fine del 19° secolo. Un botanico austriaco, Friedrich Reinitzer, notò il fenomeno nel 1888: aveva riscaldato un composto organico, il cholesteryl benzoate, ed aveva osservato che aveva due punti di fusione differenti, a 145° diventava un liquido opaco e tornava chiaro a 179°.

Un professore di fisica tedesco, Otto Lehmann, studiò il fenomeno e, utilizzando un microscopio in grado di riscaldare il composto, verificò che le molecole non fondono direttamente, ma passano per una fase in cui si comportano come un liquido, pur mantenendo la struttura molecolare e le proprietà ottiche di un cristallo solido. Coniò quindi, nel 1889, il termine "cristallo liquido".

Solo nel 1968 furono sviluppati i primi display a cristalli liquidi presso il Centro Ricerche David Sarnoff della RCA negli Stati Uniti.

La tecnologia si è sviluppata notevolmente e gli LCD (Liquid Crystal Display) trovano oggi applicazione in orologi, strumentazione, telecamere e monitor, notebook, telefoni mobili.

Sono in uso due tipologie di LCD:

- *dual-scan twisted nematic* (DSTN), di minor costo

- *thin film transistor* (TFT), caratterizzati da elevata qualità dell'immagine

3. Principio di funzionamento dei cristalli liquidi

Gli LCD sono una tecnologia di tipo trasmissivo, a valvola di luce: la luce bianca viene filtrata (viene variata la quantità di luce che transita attraverso il dispositivo) ottenendo la scala dei grigi. I colori vengono ottenuti semplicemente filtrando la luce bianca.

La maggior parte dei cristalli liquidi è costituita da molecole allungate che, normalmente, si dispongono con l'asse maggiore parallelo a quelle delle molecole a loro prossime. E' pos-

sibile controllare l'allineamento delle molecole se il cristallo liquido è posto su una superficie finemente corrugata: se le corrugazioni sono parallele anche le molecole si dispongono parallele l'une alle altre.

Un LCD consiste in un cristallo liquido compreso fra due superfici finemente corrugate, le corrugazioni di una superficie sono perpendicolari a quelle dell'altra superficie. Se le molecole prossime ad una superficie hanno direzione nord-sud, quelle prossime all'altra superficie hanno direzione est-ovest, quelle intermedie sono ruotate nella direzione intermedia (figura 1). La luce che passa attraverso il dispositivo modifica la propria polarizzazione seguendo l'orientamento delle molecole; quindi, transitando per il cristallo liquido, viene ruotata di 90°. I laboratori della RCA dimostrarono che, quando viene applicata un campo elettrico al cristallo liquido, le molecole si dispongono verticalmente e quindi la luce passa senza subire la rotazione di polarizzazione (figura 2).

Esternamente a questi tre strati (superficie corrugata - cristallo liquido - superficie corrugata) vengono posti due ulteriori strati: filtri polarizzanti per la luce disposti a 90° fra loro. Se non è applicata tensione, la luce passa per il primo filtro e viene polarizzata, transita per il cristallo liquido, subisce quindi una rotazione della polarizzazione pari a 90° e infine transita per il secondo filtro: in assenza di tensione la luce passa. Se è applicata tensione, la luce viene polarizzata dal primo filtro, transita inalterata per il cristallo liquido e viene bloccata dal secondo filtro: in presenza di tensione la luce viene bloccata. Al fine di ridurre il consumo di energia elettrica in genere si preferisce far si che la mancanza

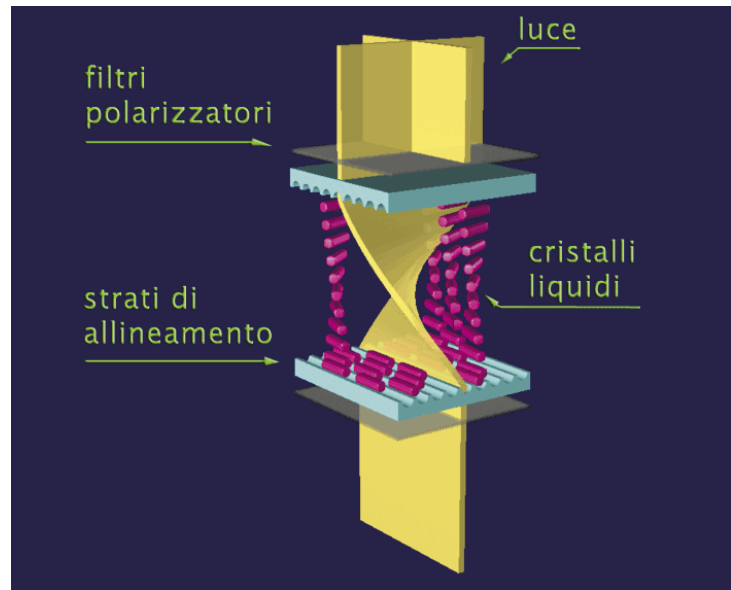



Fig. 1 - In un LCD le molecole prossime ad una delle superfici hanno direzione nord-sud, quelle prossime all'altra superficie hanno direzione est-ovest, quelle intermedie sono ruotate nella direzione intermedia La luce che passa attraverso il dispositivo modifica la propria polarizzazione seguendo l'orientamento delle molecole e viene ruotata di 90°.

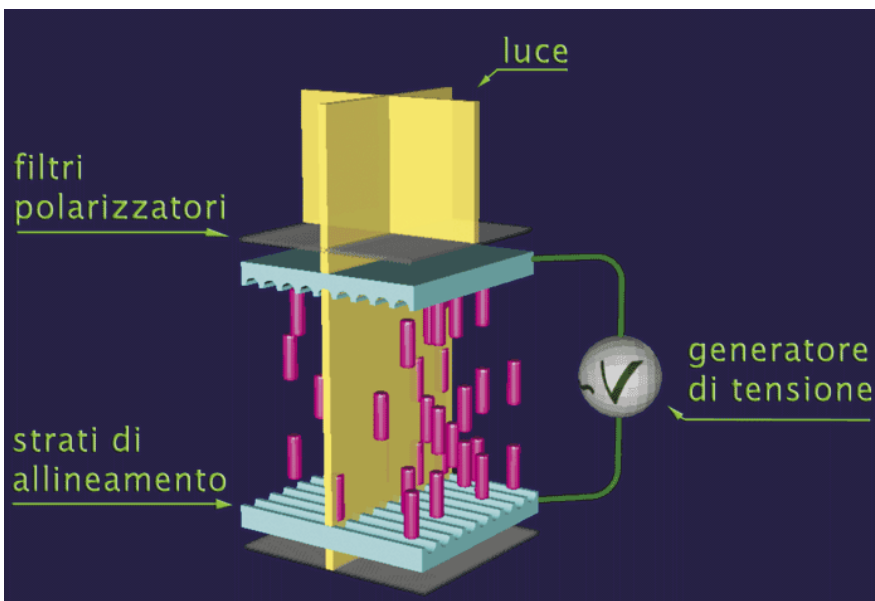



Fig. 2 - Quando viene applicato un campo elettrico al cristallo liquido, le molecole si dispongono verticalmente: la luce passa senza subire la rotazione .

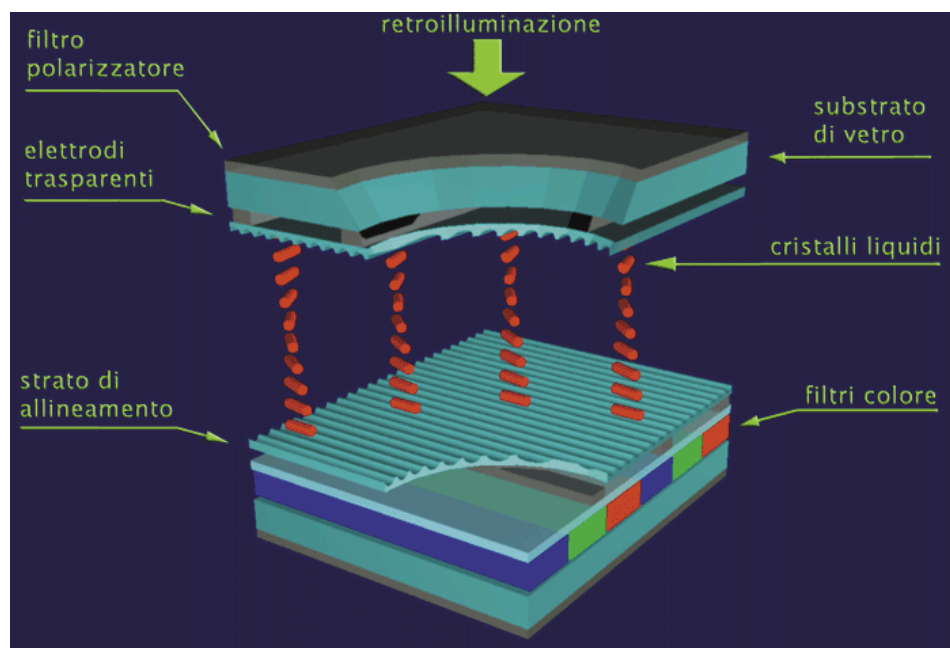



Fig. 3 - I diversi strati che costituiscono un LCD a matrice passiva (DSTN).

di tensione applicata corrisponda al passaggio della luce, anche se è possibile operare nel modo duale.

4. I display a matrice passiva TN e DSTN (*Dual Scan Twisted Nematic*)

Un LCD a matrice passiva è costituita da un insieme di strati (figura 3):

- un elemento è costituito da un substrato di vetro con superficie in ossido di metallo, molto trasparente per non compromettere la qualità dell'immagine. E' dotato di una griglia di elettrodi, necessari ad attivare i singoli elementi dello schermo. Su di esso è uno strato di polimero con una serie di solchi paralleli per allineare le molecole del cristallo liquido.
- un altro elemento, analogo al primo, è costituito da un altro substrato di vetro, completo di strato di allineamento, e dotato di spaziatori per mantenere una distanza uniforme tra i due elementi.

I due elementi sono saldati con una resina epossidica ai lati e il cristallo liquido è iniettato nell'intercapedine. L'insieme è sigillato completamente. Vengono infine applicati gli strati polarizzati esterni. Negli LCD l'orientamento degli strati di allineamento varia da 90° a 270°, in funzione della rotazione totale del cristallo liquido compreso fra di essi.

La luce posteriore è fornita generalmente da tubi fluorescenti a catodo freddo montati lungo i lati superiori e inferiori ed è distribuita su tutto il pannello usando guide di luce o prismi di plastica.

La griglia di elettrodi è organizzata in righe e colonne, in uno schermo VGA[Nota 1] vi sono quindi 640 transistor per pilotare le colonne e 480 transistor per pilotare le righe. Per indirizzare i singoli pixel, le righe sono attivate in sequenza, e quindi ogni riga è attiva solo per un breve tempo in ogni periodo di rinfresco dello schermo. Ne consegue che la risposta degli LCD con il sistema di pilotaggio a matrice passiva risulta molto lenta e non è in grado di seguire i cambiamenti veloci nel contenuto d'immagine. Inoltre si ha il fenomeno di "ghosting", l'area di pixel "accesi" interferisce con i pixel "spenti" appartenenti alle stesse righe e colonne.

Migliori tempi di risposta sono stati ottenuti organizzando lo schermo in due parti e effettuando il rinfresco in modo indipendente

per ciascuna di esse, questi schermi sono denominati DSTN.

Nel corso degli anni ‘90 vi sono stati numerosi miglioramenti tecnologici per quanto riguarda la velocità di risposta (con formulazioni del cristallo liquido caratterizzati da minor viscosità), nel contrasto, nel pilotaggio degli elettrodi.

Per ottenere gli LCD a colori si aggiungono semplicemente dei filtri colorati (rosso, verde e blu) in modo che a ciascun pixel corrispondano tre elementi colorati.

Il livello di luminanza di ciascun pixel è ottenuto variando la tensione applicata al cristallo liquido, infatti la posizione delle molecole del cristallo liquido, e di conseguenza la quantità di luce che transita, è proporzionale alla tensione applicata. La precisione che si può ottenere è pari a circa 64 livelli (ovvero 6 bit) per ciascun colore. Per consentire applicazioni multimediali, per cui è importante la fedeltà cromatica per le immagini, sono state sviluppate tecniche in base alle quali vengono modificati i livelli nel corso di tre o quattro rinfreschi consecutivi dell’immagine. In questo modo si ottengono precisioni prossime a 256 livelli (8 bit) per ciascuno dei colori primari, analoghe a quelle *TrueColour* (24 bit, 16 milioni di colori) fornite dai CRT (*Cathod-Ray-Tube*) .

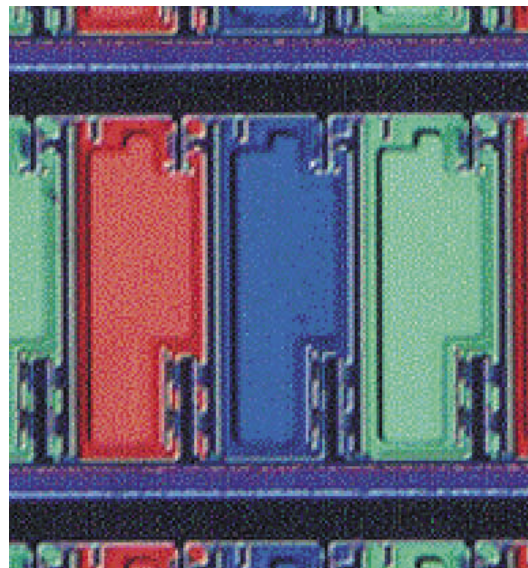



Fig. 4 - Immagine ingrandita di un TFT

5. I display a matrice attiva o TFT (*Thin Film Transistor*)

Nei display a matrice attiva ad ogni elemento di ciascun pixel è associato un transistor (figura 4). Pilotando i singoli elementi di immagine si eliminano i problemi di “ghosting” e di bassa velocità di commutazione. Si ottengono così tempi di risposta dell’ordine di 25 ms (contro i 300 ms dei DSTN), rapporti di contrasto compresi fra 200:1 e 400:1 (40:1 per i DSTN), e valori di flusso luminoso tra le 200 e le 250 cd/m2[Nota 2].

Nota 1.
VGA - Video Graphics Array o Video Graphics Adapter. Indicava in origine un formato di immagine pari a 640x480 pixels, con 16 colori. Questo standard ha sostituito i primi standard grafici, il **CGA** (Colour Graphics Adapter) e **EGA** (Enhanced Graphics Adapter).
SVGA - Super-VGA descriveva inizialmente le schede grafiche in grado di supportare risoluzioni di 800x600 pixel con 256 colori o 1024x768 pixel con 16 colori.
Attualmente le denominazioni si riferiscono al formato massimo dell’immagine, poiché in genere vengono, almeno nominalmente, supportati 16 milioni di colori.
XGA (1024x768),
SXGA+ (1400x1050), UXGA (1600x1200) e QXGA (2048x1536)

Nota 2.
Duecento anni fa la candela di riferimento era costituita da 0,167 librae troy di grasso di balena, di diametro sufficientemente grande da bruciare a 120 grani per ora per una durata di 8 ore. Al giorno d’oggi la candela è un delle unità base SI, per l’intensità luminosa.
La candela (cd) è l’intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente luminosa che emette una radiazione monocromatica di fequenza 540x1012 Hertz e che possiede una intensità radiante in quella direzione di 1/683 watt per steradiante.
Il flusso luminoso si misura in lumen (lm), il lumen è definito come il flusso luminoso emesso in un angolo solido di 1 steradiante da una sorgente luminosa puntiforme dell’intensità di 1 candela.
Luminanza è la quantità di radiazione luminosa per unità di area della sorgente luminosa, è misurata in nit (candele per metro quadro).
Illuminanza è la quantità di radiazione visibile che cade sull’unità di area, è misurata in lux (lx. lumen per metro quadro).

I TFT sono più leggeri e più veloci (nella commutazione) dei DSTN, ma i costi di produzione sono molto più elevati. Uno schermo VGA richiede 921 mila transistor (640x480x3), mentre 2,359 milioni di transistor sono necessari per una risoluzione di 1024x768 pixel. L'intera matrice di transistor deve essere realizzata su un solo *wafer* di silicio e l'intero wafer deve essere scartato se la presenza di impurità dà origine ad alcuni pixel difettosi. Si definiscono come pixel difettosi "accesi" quelli che appaiono come elementi rossi, blu o verdi su un fondo completamente nero, si definiscono come pixel "mancanti" o "morti" quelli che appaiono come pixel neri su fondo completamente bianco. La presenza di pixel accesi è il difetto più frequente, dovuto alla presenza di transistor cortocircuitati.

Alla fine del 1996 fu introdotto un TFT che utilizzava un nuovo tipo di cristallo liquido in cui le molecole sono allineate verticalmente (VA, *vertically-aligned*): essendo perpendicolari al substrato quando non è applicata alcuna tensione, l'immagine è nera. Quando è applicata tensione, le molecole passano ad una posizione orizzontale, e l'immagine è bianca. In assenza di tensione, anche le molecole in prossimità ai substrati sono completamente verticali, ciò migliora la qualità del nero e l'angolo di visione, che raggiunge i 140° in tutte le direzioni, migliora anche il contrasto, che può raggiungere 300:1. I successivi miglioramenti (tecnologia MVA - *Multi-domian Vertical Alignment*) hanno portato ad angoli di visione ancora più ampi (160°), mentre il contrasto può ora raggiungere 500:1 e la luminanza le 250 cd/m^2. La vita di un TFT è dell'ordine di 60 mila ore: quindi, in media, la luce di un display TFT tenuto sempre in funzione si spegne dopo circa 7 anni. A scopo comparativo si consideri che un CRT non si spegne, ma ha un graduale degradamento della luminosità, tale degradamento è sensibile a partire dalle 40 mila ore di funzionamento.

6. Il mercato

I produttori di LCD furono inizialmente solo giapponesi, a partire da metà degli anni 90, si aggiunsero Corea e Taiwan.

Nello sviluppo della produzione e della commercializzazione dei TFT sono individuate varie generazioni, caratterizzate dall'incremento della superficie dello schermo e da successive generazioni degli impianti di fabbricazione. La legge di Nishinura indica un incremento della superficie di un fattore da 1,7 a 1,9 nel passaggio da una generazione alla successiva. La prima generazione (1991) era caratterizzata da dimensioni di 400x300 pixel, con la seconda generazione (1994) si passò a 500x400, la terza (1996) 650x550 e 720x600, la quarta (2000) 800x680 e 920x730, attualmente siamo alla quinta (2002) 1200x1000. Le prossime generazioni sono previste per il 2005 e 2007. La quinta e la sesta generazione sono ottimizzate per la produzione di schermi di 19" - 30".

Le vendite sono aumentante esponenzialmente in questi anni poiché la tecnologia per schermi piatti TFT è quella che attualmente soddisfa la gamma più ampia di applicazioni (dai display di orologi e telefoni ai monitor e agli schermi televisivi). Fino ad ora è stata in grado di fronteggiare la competizione con altre tecnologie (PDP, *Plasma Display Panel,* e OLED, *Organic Light Emitting Diode*) che hanno campi di applicazione più ristrette, ma è probabile che continui ad esservi una coesistenza, uno sviluppo ed una crescita delle diverse tecnologie in funzione del tipo di applicazione.

Previsioni del maggio di quest'anno (che si sono però in seguito rivelate ottimistiche) indicavano, per i TFT di ampie dimensioni (>10"), un mercato nel 2002 di circa 70 milioni di unità, per un importo di 20 milioni di \$ (essendo 24 milioni di \$ il mercato complessivo dei TFT e circa 32 milioni di \$ quello di tutti gli schermi piatti).

E' stato ipotizzato che il costo dei TFT per pollice quadrato scenda a 9 $ nel 2005, ma le riduzioni dei costi di produzione e l'incremento di mercato fanno pensare che si possa raggiungere questo obiettivo in anticipo.

Nel mese di aprile è stato introdotto un televisore con grande schermo TFT da 30" compatibile con l'alta definizione (16:9, 1280 x 768 pixel, luminanza 430 cd/m^2, rapporto di contrasto 500:1, angolo di visione 170° x 170°) ad un prezzo di listino (per il mercato USA) prossimo a 8000 $. Il prezzo di televisori con schermo di dimensioni inferiori è ovviamente più accessibile (si può acquistare il modello da 20" con meno di 2000 $).

Riferimenti bibliografici

Sul web è possibile reperire numerose informazioni sulle attività di ricerca e tutorial sul tema "cristalli liquidi" (ad esempio il programma pilota Polymers and liquid Crystals propone un ipertesto ed un laboratorio virtuale, www.abalone.phys.cwru.edu) e sulle tecnologie LCD (ad esempio www.pctechguide.com e www.sharp.co.jp/sc/library/lcd_e/indexe.htm).

Che cosa è, come funziona: display al plasma (PDP, ALiS)

ricerca bibliografica e testo:
ing. Marzio **Barbero** e
ing. Natasha **Shpuza**

grafica 3D: ing. Mario **Muratori**

1. Premessa

Gli schermi piatti al plasma PDP (*Plasma Display Panels*) rappresentano al momento i candidati principali per la visualizzazione in ambito domestico (*home theatre*) di immagini televisive a definizione convenzionale e ad alta definizione, in alternativa ai CRT (*Cathode Ray Tube*) di cui sono dotati gli attuali televisori. Per questa ragione sono stati ampiamente considerati negli articoli comparsi su Elettronica e Telecomunicazioni (nel numero 3 del dicembre 2000 e in questo numero).

Tali articoli non approfondiscono, tuttavia, gli aspetti tecnologici e costruttivi del PDP, che sono invece oggetto di questa scheda.

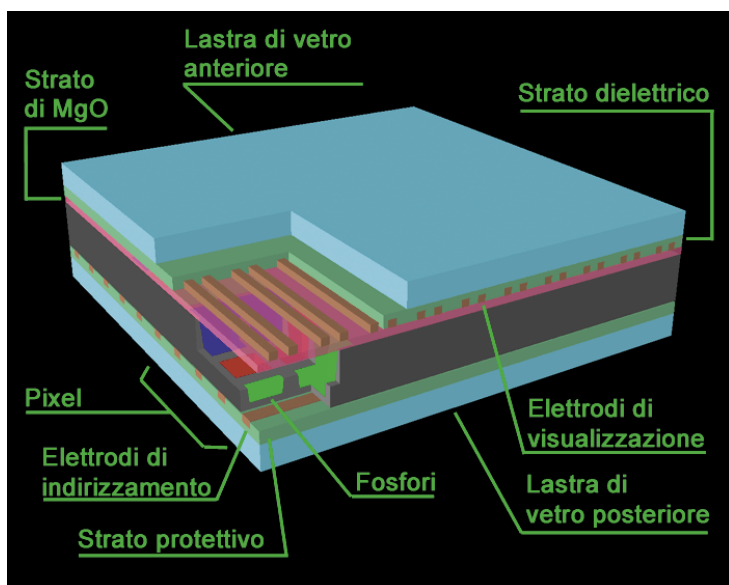
Fig. 1 - struttura di base di un PDP

2. Cenni storici

Il PDP di tipo ac (*alternating current*) fu inventato dall'Università dell'Illinois nel 1964, mentre Philips introdusse il PDP di tipo dc (*direct current*) nel 1968. L'ac-PDP ha dominato nell'attività di ricerca e sviluppo ed il primo PDP (da 42") che ha dimostrato la fattibilità della produzione di massa è stato introdotto dalla Fujitsu nel 1995.

3. Principio di funzionamento dei PDP

Un PDP si può considerare simile al CRT poiché il funzionamento si basa sulla fluorescenza: l'emissione della luce da parte di fosfori. D'altro canto, i PDP hanno una struttura a matrice, simile a quella degli LCD. In pratica si tratta di una matrice di piccoli tubi fluorescenti controllati in modo sofisticato.

La struttura di base di un PDP è rappresentata in figura 1: è costituita da una matrice di celle comprese tra due lastre di vetro. In prossimità del vetro anteriore si trovano gli elettrodi del display, in materiale trasparente, protetti da uno strato di materiale dielettrico e coperti da uno strato protettivo (di un materiale con elevato coefficiente di emissione secondaria di elettroni, come l'ossido di magnesio MgO). Gli elettrodi di indirizzamento sono invece posti sopra la lastra di vetro posteriore, protetti da uno strato di dielettrico. Gli elettrodi sono

disposti come una griglia (quelli del display sono disposti orizzontalmente e quelli di indirizzamento verticalmente).

Ogni cella è costituita da tre sottocelle separate mediante delle costole (*rib*), perpendicolari allo schermo: le sottocelle sono coperte di fosfori di colore rosso o verde o blu, il fosforo copre anche il dielettrico posto nel retro della cella, mentre la parte anteriore della cella rimane trasparente.

Un campo elettrico è applicato ad un gas mantenuto a bassa pressione (circa mezza atm) all'interno della singola sottocella (figura 2a),

Quando viene applicata una tensione elevata (150 - 250 V) agli elettrodi che si intersecano in corrispondenza di ogni singola cella, si ha passaggio di corrente nel gas in essa contenuto. Il gas cambia stato, viene ionizzato e diventa plasma (un mezzo conduttivo che contiene approssimativamente lo stesso numero di particelle cariche positivamente e negativamente) (figura 2b). Il gas è una miscela, di norma Ne (neon) e Xe (xenon) e un certo numero di atomi di Xe vengono eccitati ed emettono raggi ultravioletti alla linea spettrale di interesse (147 nm), lo scopo degli atomi di Ne è quello di generare un flusso secondario ionizzato (figura 2c).

I raggi ultravioletti colpiscono gli atomi di fosforo. Gli elettroni degli atomi di fosforo passano ad un livello energetico superiore e, quando ritornano al livello precedente, emettono energia sotto forma di luce visibile, del colore appropriato (rosso, verde e blu) (figura 2d).

Ciascuna delle sottocelle è pilotata in modo indipendente con impulsi (denominati di scrittura, cancellazione, sostenimento) e attraverso un sistema di modulazione di durata di tali impulsi è possibile generare 256 livelli (8 bit) per ciascuna componente e far si che, nel complesso, la gamma di colori percepita dall'occhio sia analoga a quella dei CRT.

Essendo un sistema basato sull'emissione di luce, come il CRT, il PDP non ha problemi di assicurare un ampio angolo di visione (superiore a 160° x 160°).

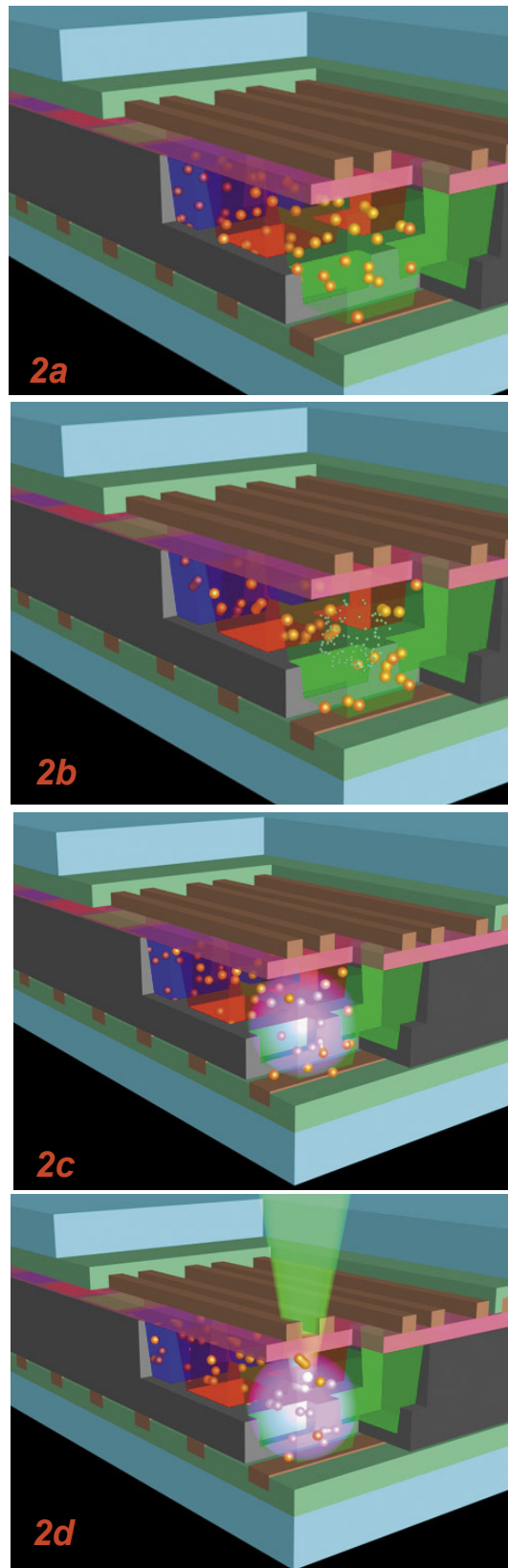



Fig. 2 - principio di funzionamento del PDP, quando è applicata tensione ad una cella il gas ionizzato emette raggi ultravioletti che colpiscono i fosfori, che a loro volta emettono la luce visibile.

Sono stati introdotti via via miglioramenti nella struttura di base del PDP per ridurre i problemi tipici della tecnologia. Un esempio di limitazione è quello relativo al contrasto: le celle devono essere “inizializzate”, applicando una bassa tensione costante a tutte le celle, al fine di migliorare il tempo di risposta, di conseguenza anche le celle spente emettono una debole luce, riducendo così il contrasto. Attualmente i valori di contrasto superano il rapporto 500: 1, ma esistono modelli per è dichiarato un contrasto 3000:1.

Sono state proposte strutture diverse per realizzare i pannelli al plasma.

Nei prodotti attualmente in commercio è utilizzata quella denominata ac-PDP. Come nel caso dei tubi a fluorescenza, occorre una tensione elevata per causare il cambio di stato del gas, ma successivamente basta una tensione più bassa per mantenere la reazione: nel caso della struttura ac-PDP ci sono due elettrodi trasparenti sulla superficie del substrato superiore in vetro, uno per inizializzare la reazione ed uno per mantenerla. L’elettrodo di indirizzamento è posto sulla lastra di vetro posteriore.

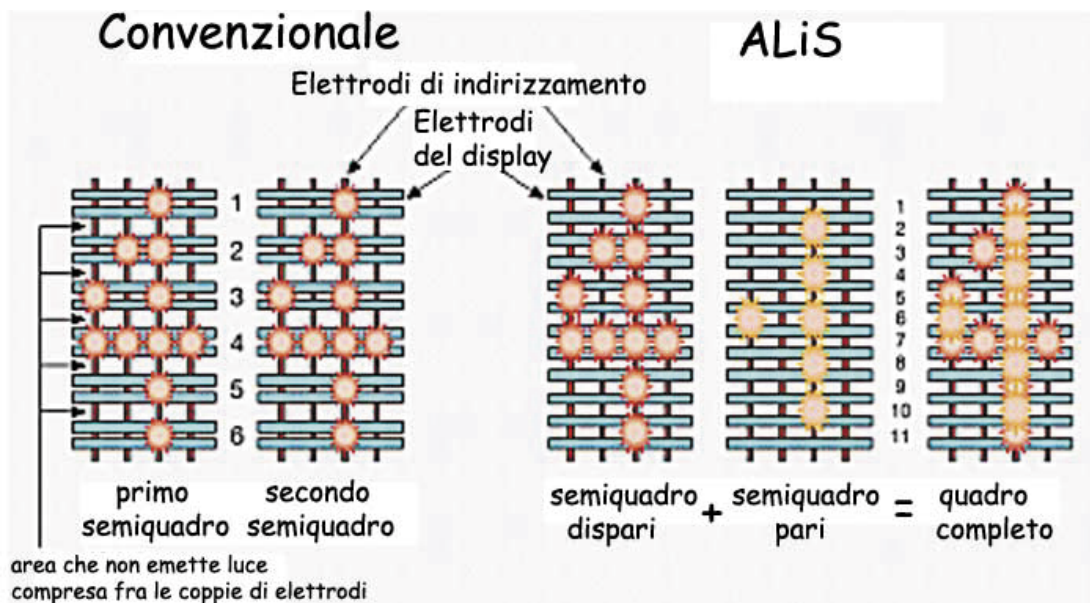
Il sistema dc-PDP utilizza solo due elettrodi per ciascuna sottocella, uno posto e in prossimità del vetro anteriore l’altro di quello posteriore. Richiede una tensione operativa superiore rispetto alla struttura ac e quindi la vita del dispositivo è inferiore, l’angolo di visione è ridotto e si ottiene un minor contrasto.

4. ALiS (*Alternate Lighting of Surfaces*)

Fujitsu ha sviluppato un tipo di ac-PDP utilizzando una tecnica, introdotta nel 1998 e denominato ALiS, che è basata sulla scansione interlacciata, anziché quella progressiva.

Nel PDP a scarica superficiale, la scarica è generata applicando la tensione tra due elettrodi trasparenti, depositati sul vetro anteriore e paralleli fra loro. Con la tecnica ALiS gli elettrodi sono equispaziati e sono attivati alternativamente, a semiquadri alterni: in pratica è possibile indirizzare ciascuna metà della cella in modo indipendente, raddoppiando la definizione verticale (figura 3).

In questo modo si raggiungono rapporti di contrasto pari a 500:1 e luminanza fino a 700 cd/m^2, e, in linea di principio, anche la vita dei fosfori viene prolungata.

Fig. 3 - Illustrazione della tecnica ALiS. Viene utilizzata tutta l’area aumentando la luminanza dello schermo. A titolo di esempio ecco le caratteristiche del PDP ALiS da 32” (formato d’immagine 16:9, 852 x 1024 pixel, luminanza 640 cd/m2, peso 12,5 kg, profondità 66 mm, consumo 200 W) e del PDP ALiS da 42” (16:9, 1024 x 1024, 750 cd m2, peso 18 kg, profondità 65 mm)

5. Il mercato

La struttura del PDP, basata su celle di dimensioni relativamente ampie, è adatta a realizzare schermi piatti di grandi dimensioni, generalmente superiori ai 40” e i PDP tuttora più diffusi sul mercato sono da 42”. Sono disponibili schermi di dimensioni superiori, da 50” e, dal 2001, da 61” (figura 4).

Si stima che nel 2001 siano stati venduti globalmente 315 mila PDP e che quest’anno questo numero salirà a 520 mila. Attualmente il mercato si rivolge soprattutto ad applicazioni professionali (sale di conferenze, show room e mostre), mentre è limitato il mercato domestico. Ovviamente ciò è dovuto essenzialmente al prezzo, che rimane tuttora fra i 6000 e i 30000 €.

Vi sono previsioni di crescita accelerata, che porterebbero nel 2005 a una produzione annuale pari 2,8 milioni di PDP. Tali proiezioni sono basate sulla previsione di riduzione del costo dei materiali e componenti, sulle future economie nella produzione in larga scala e sulla maggiore competizione (fino ad ora il mercato è stato dominato dai produttori giapponesi, ma recentemente due aziende coreane hanno pianificato investimenti nella ricerca e sviluppo e nella realizzazione di impianti ad elevata capacità produttiva).

Vi sono osservatori scettici sulla possibilità che il futuro avallerà tali previsioni: negli ultimi anni vi sono stati notevoli progressi nel superamento dei problemi legati alla tecnologia e al processo di fabbricazione, ma i problemi che tuttora ostacolano una diffusione a livello domestico, a parte il costo, sono il consumo energetico (dipende dalle dimensioni dello schermo, è superiore a 280 W anche per gli schermi da 42”), alcuni difetti di visualizzazione delle immagini, la perdita di luminanza con il tempo (simile a quella che si riscontra con i CRT, ma molto più rapida, dovuta al degradamento dei fosfori).

Quello dei PDP è comunque un mercato di nicchia, se confrontato con quello dei CRT per la televisione (valutato pari a 153 milioni di pezzi venduti nel 2001 e tuttora in crescita).

Fig. 4 - Dimensioni di PDP a 42”, 50” e 61” a confronto. Caratteristiche del PDP PlasmaSync MP1 (NEC) da 61”: 16:9, 1366 x 768 pixel, peso 61 kg, consumo 660 W, profondità 119 mm, da notare il basso livello di rumore acustico, dovuto ai ventilatori per il raffreddamento, 22 dB).

Che cosa è, come funziona: *proiettori a microspecchi (DMD™, DLP™)*

ing. Marzio **Barbero**
(Rai - Radioteleviaione Italiana
Centro Ricerche e Innovazione
Tecnologica)
ing. Natasha **Shpuza**
(RTSH - Radio Televizion Shqiptar)

1. Premessa

L'articolo "Sistemi a proiezione basati su microspecchi", nel n. 3 del dicembre 2000 di Elettronica e Telecomunicazioni descriveva il principio di funzionamento dei sistemi a proiezione e retroproiezione basati sui dispositivi DMD™ e prospettava che tale tecnologia avesse un futuro molto promettente, anche per la visualizzazione di immagini televisive (a definizione normale e in alta definizione).

Tali prospettive si stanno concretizzando sia in termini di prestazioni che di prezzi, come si evince nella sezione 6 di questa scheda. In particolare ormai tutte le aziende che operano nel settore dei proiettori per applicazioni *business* includono sistemi basati su microspecchi, in alternativa a quelli basati sulla tecnologia dei cristalli liquidi (TFT). Per quanto riguarda i retroproiettori, adatti per l'*home theatre,* i modelli recentemente annunciati sono caratterizzati da minor ingombro e peso e i prezzi si sono ridotti ad un terzo (rispetto ai modelli precedenti): sono quindi un'alternativa valida (anche se non possono rivaleggiare per quanto riguarda la profondità) agli schermi al plasma (PDP). Sono stati finora prodotti più di un milione di sottosistemi basati sulla tecnologica DLP

Le restanti sezioni, dalla 2 alla 5, ripropongono, aggiornate, le informazioni già presenti nel citato articolo.

2. Cenni storici

Nel 1987 venne inventato il DMD (Digital Micromirror Device), il dispositivo microspecchio digitale è alla base dei sistemi DLP (Digital Light Processing). DMD™ e DLP™ sono marchi della Texas Instruments Incorporated. Nel 1991 venne avviato il progetto per la realizzazione di prodotti basati su tale tecnologia ed il primo di tali sistemi venne commercializzato nell'aprile 1996. Il Centro Ricerche della Rai fu uno dei primi a dotarsi di un sistema (risoluzione 1024 x 768, luminosità 5000 lumen, peso 91 kg) per valutare prestazioni e limiti di questi sistemi per applicazioni televisive.

3. Principio di funzionamento dei sistemi a microspecchi

Vi sono sistemi di visualizzazione basati sulla emissione da parte di fosfori colpiti da elettroni (CRT - *Cathode Ray Tube* e PDP - *Plasma Display Panel*), altri funzionanti sul principio della valvola di luce (LCD - *Liquid Crystal Device* o di quelli a film d'olio, sviluppati all'inizio degli anni '40 dall'Istituto Federale Svizzero della Tecnologia). I dispositivi a microspecchi sono invece alla base di sistemi di proiezione a riflessione: l'immagine si forma su un dispositivo in grado di riflettere la luce e quindi, attraverso un insieme di lenti, consentire la proiezione dell'immagine sullo schermo.

I sistemi DLP sono basati sulla riflessione della luce da parte di una schiera di veloci interruttori, ciascun interruttore è uno specchio quadrato in alluminio di lato pari a 16 µm (per meglio valutare le dimensioni si osservi la figura 1).

Il DMD fa parte di una classe di dispositivi noti come sistemi microelettromeccanici (MEMS, microelettromechanical systems) definibili come "dispositivi, o insiemi di dispositivi, ad elevata miniaturizzazione che combinano componenti elettrici e meccanici e che sono fabbricati usando tecniche per la produzione dei circuiti integrati". Questa classe comprende altri dispositivi, ad esempio sensori di pressione e accelerometri, che trovano applicazione in vari campi: nell'industria automobilistica (sensori di pressione dei pneumatici, accelerometri per airbag …) e in campo medico (sensori della pressione sanguigna, stimolatori dei muscoli …).

Il DMD è costituito da una matrice, o schiera, di specchi (fino a 1,3 milioni di specchi) disposti su una superficie analoga a quella di un'unghia) ciascuno dei quali può assumere due posizioni (acceso o spento, on e off, 1 o 0) e ruota di ±10° o ±12° (vi sono due varianti di chip) in funzione della attrazione elettrostatica tra la struttura dello specchio e gli elettrodi connessi alla sottostante cella di memoria. In figura 2 è schematizzata la struttura di un singolo elemento.

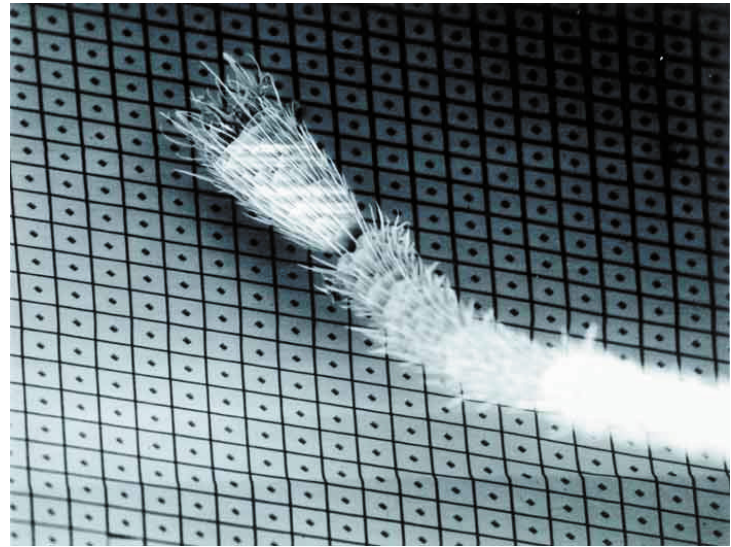



Fig. 1 - Microfotografia di una zampa di formica sulla superficie DMD. Ciascun specchio, quadrato di lato 16 µm, è separato dagli adiacenti di 1 µm.

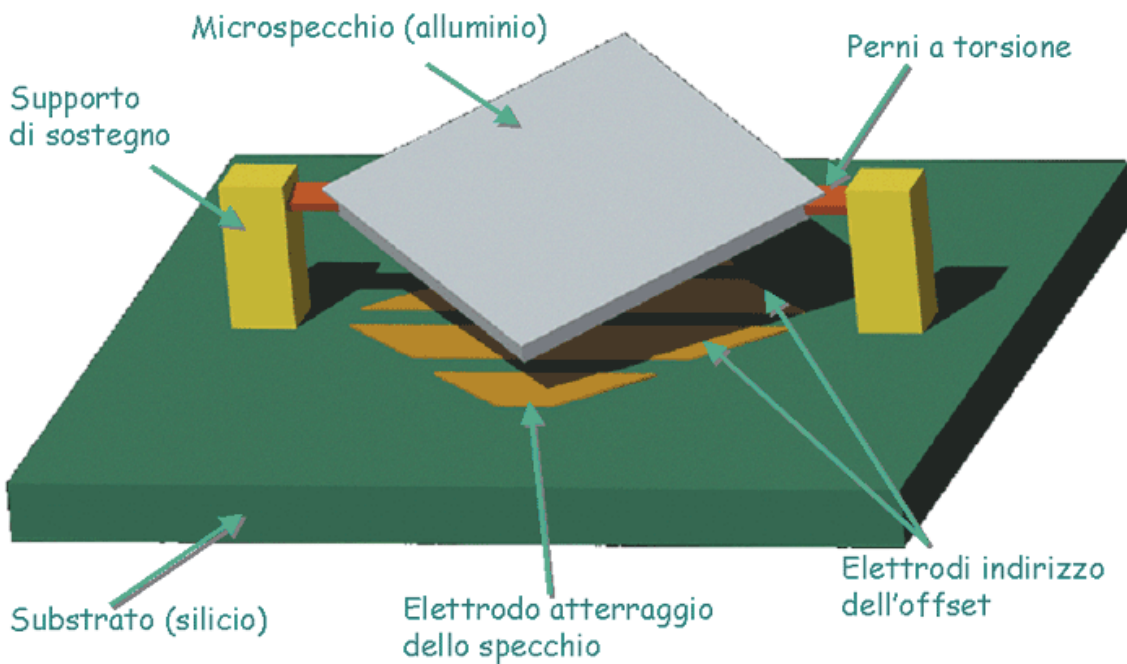
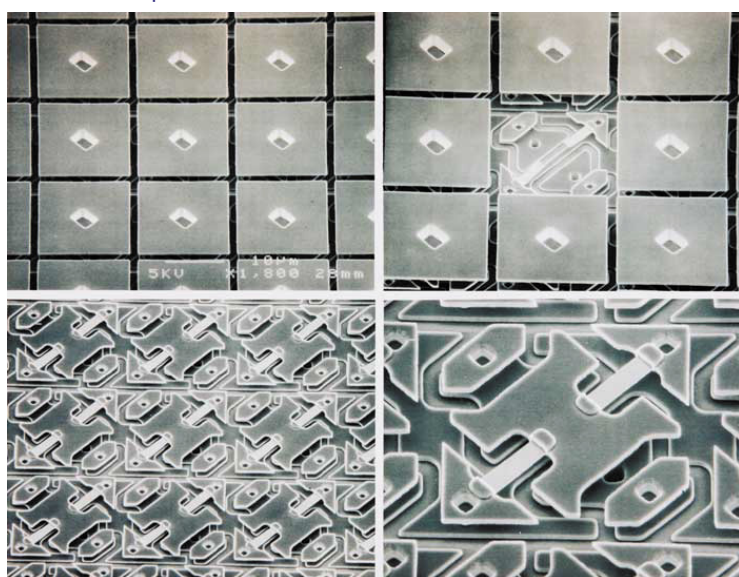



Fig. 2 - Rappresentazione semplificata di un singolo elemento di DMD (un pixel).

Fig. 3 - Rappresentazione esplosa di un singolo elemento DMD. Ciascun specchio quadrato di 16 µm di lato consiste di tre strati fisici e due strati di separazioni intermedi che consentono allo specchio di inclinarsi di +10 o -10 gradi.

Fig. 4 - Queste microfotografie illustrano una porzione di DMD™. In alto a sinistra sono visibili 9 microspecchi. Nella foto in alto a destra è stato rimosso quello centrale ed è così visibile la struttura dei perni. Nella foto In basso a sinistra tutti i microspecchi sono stati rimossi. Infine, la foto in basso a destra mostra un ulteriore ingrandimento della struttura sottostante al microspecchio.

La figura 3 è una rappresentazione esplosa di un singolo microspecchio e in figura 4 alcune microfotografie illustrano la struttura reale della schiera di specchi.

Per quanto riguarda l'affidabilità, in letteratura, basata su test di laboratorio, viene indicata una stima di MTBF (tempo medio fra guasti) superiore a 119 000 ore. In pratica i dispositivi dovrebbero operare oltre 10 anni, fino a 50 anni nel caso di uso non particolarmente frequente.

Queste sono alcune delle motivazioni di tale elevata affidabilità:

I perni, che permettono agli specchi di ruotare migliaia di volte al secondo, non si piegano o non si rompono perché le leggi della meccanica hanno effetti diversi quando si applicano a oggetti miniaturizzati. Un materiale, sottoposto a "fatica", cioè piegato ripetutamente, si rompe a causa dello spostamento, all'interno della struttura cristallina, dei singoli cristalli che lo compongono. Nel caso del perno del microspecchio, a ragione delle dimensioni microscopiche, tutti i cristalli si trovano sulla superficie della struttura: non esiste una struttura di cristalli interni e quindi il fenomeno di stress dovuto allo spostamento non ha conseguenze.

Gli specchi non rimangono "incollati" perché il progetto del dispositivo ha portato all'eliminazione delle possibili cause di blocco dello specchio: vi sono delle minuscole molle che spingono lo specchio lontano dalla superficie di atterraggio, quando cessa la forza elettrostatica; sono stati ridotti al minimo gli effetti delle forze di van der Waals che causano l'attrazione dei materiali a livello molecolare; gli effetti dovuti alla possibile condensazione dell'umidità sono ridotti poiché il dispositivo è sigillato in ambiente secco in un package ermetico che assicura l'assenza di umidità per l'intera vita del dispositivo.

I microspecchi non sono fragili. La rottura, ad esempio di un vetro, è normalmente causata dalle vibrazioni; nel caso di superstrutture DMD i modi di vibrazione sono caratterizzati da frequenze almeno di due ordini di grandezza

superiori a quelle generate nell'uso normale (la frequenza di risonanza più bassa è 100 kHz, le successive armoniche sono dell'ordine dei MHz). In pratica le sorgenti di vibrazione e di shock di esperienza quotidiana, ad esempio la caduta sul pavimento, non hanno particolari conseguenze sui dispositivi a microspecchi.

La probabilità di un microspecchio difettoso è bassa: i processi di fabbricazione dei DMD sono gli stessi utilizzati per la produzione dei circuiti integrati (*clean-room* per la fabbricazione dei *wafer*) e l'attuale resa è così elevata da consentire di soddisfare la richiesta di dispositivi garantiti, al momento della fabbricazione, privi di difetti al 100%.

4. Il sistema di proiezione

La figura 5 schematizza il principio di funzionamento di un proiettore a riflessione basato su DMD: gli specchi sono comandati singolarmente e indirizzano la luce generata da un'opportuna sorgente o verso lo schermo (attraverso il sistema di lenti) oppure verso una superficie assorbente.

La scala dei grigi viene ottenuta utilizzando una tecnica di modulazione di ampiezza d'impulso (PWM, *pulse width modulation*): il singolo microspecchio viene rapidamente commutato (tempo di commutazione meccanica ~15 ms e di commutazione ottica ~2 ms) e il rapporto tra il tempo in cui è "*on*" e il tempo in cui è "*off*" è direttamente proporzionale al livello di luminosità del punto corrispondente sullo schermo.

Fig. 5 - In questa rappresentazione schematica la luce incide su tre specchi (ovvero tre pixel). Due specchi (nello stato "on") riflettono la luce che attraverso il sistema di lenti arriva allo schermo producendo due pixel bianchi. Lo specchio centrale (nello stato "off") riflette la luce incidente verso una superficie assorbente e quindi il corrispondente pixel sullo schermo risulta nero.

Questo modo di funzionamento è alla base di due delle caratteristiche principali di questi sistemi di visualizzazione:

- i DMD sono pilotati direttamente da parole binarie che individuano i singoli livelli di luminanza ed è quindi realizzabile un sistema completamente digitale, dove l'informazione relativa all'immagine numerica (derivata ad esempio da un segnale video MPEG oppure generata direttamente da un PC) viene trasformata in informazione visuale senza necessità di utilizzare un convertitore digitale/analogico;
- grazie all'elevata frequenza di commutazione, il sistema psico-visivo umano non percepisce flicker .

Sono state commercializzate configurazioni differenti di proiettori, che utilizzano uno, due o tre DMD. I proiettori con un solo dispositivo sono quelli caratterizzati da un minor costo, basso peso, assenza di problemi legati alla convergenza: sono adatti per sistemi portatili

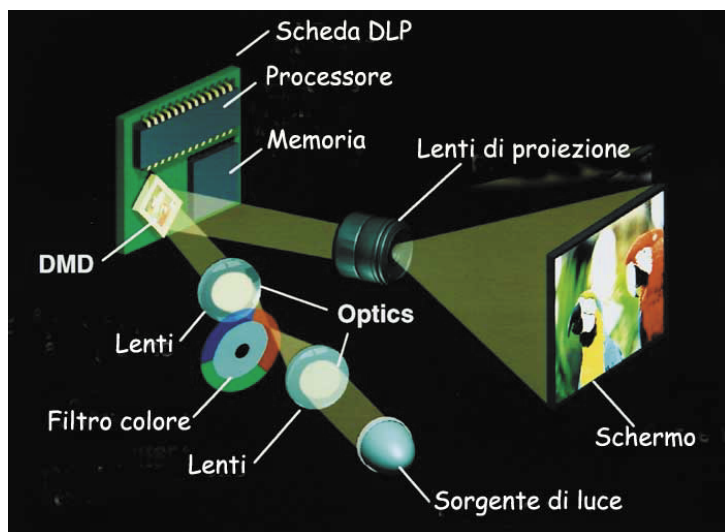



Fig. 6 - Schema di funzionamento di un sistema basato su un solo DMD™. Gli specchi sono commutati in modo da riflettere la luce sulla base dell'informazione video e il sistema visivo umano integra i colori in sequenza, si ottiene così la percezione dell'immagine a colori.

e i retroproiettori. I sistemi a tre dispositivi forniscono le maggiori prestazioni in termine di luminosità e sono utilizzati per proiezioni in luoghi pubblici (fiere, sale per conferenza e teatri).

In figura 6 è schematizzato lo schema di funzionamento della configurazione che utilizza un solo DMD. La luce monocromatica passa attraverso tre filtri (rosso, verde, blu) che costituiscono le tre porzioni di una ruota: quindi l'informazione di crominanza, così come quella di luminanza, viene ottenuta grazie alla tecnica di modulazione d'impulso della luce e alla elevata velocità di commutazione dei microspecchi. Per migliorare l'efficienza è stato recentemente sviluppato un sistema che permette di minimizzare la luce non trasmessa attraverso la ruota, ma assorbita all'interno del proiettore (figura 7). Con queste nuove tecniche è possibile raggiungere con un solo modulatore l'efficienza che caratterizzava precedentemente i sistemi basati su tre DMD.

Fig. 7 - La luce bianca passa attraverso un integratore e diretta su una ruota denominata SCR (Sequential Color Recapture). La luce è scomposta nelle componenti rosso, verde, blu, la luce che non transita viene riflessa indietro all'integratore e catturata nuovamente. Viene quindi ridiretta sulla ruota SCR. In questo modo si ha un aumento del 40% in termini di lumen rispetto ad un sistema tradizionale, che non sfrutta la luce riflessa, di generazione di colori sequenziale a ruota.

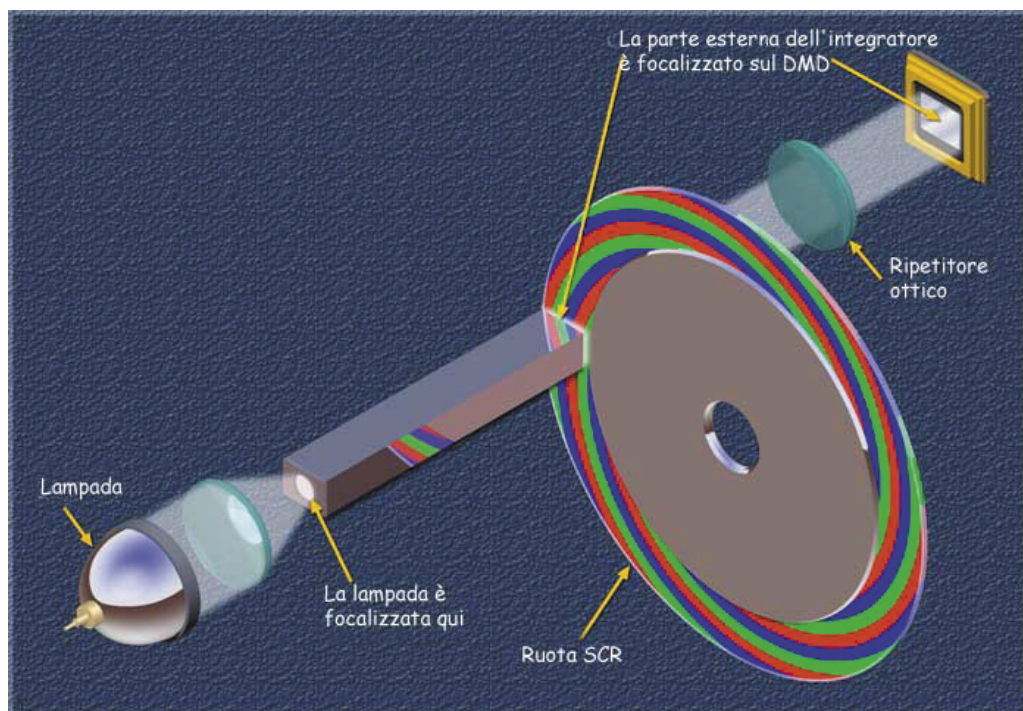



Fig. 8 - Schema di flusso generico che rappresenta le elaborazioni a cui è soggetto il segnale video per adattarlo alla visualizzazione

5. Pre-elaborazione dell'immagine

I microspecchi sono il cuore di un sistema molto articolato che implica una complessa elaborazione del segnale video in ingresso.

Il diagramma di flusso che rappresenta i possibili stadi di pre-elaborazione del segnale video prima della visualizzazione è in figura 8.

Il primo blocco funzionale comprende la demodulazione e la decodifica del segnale video, che può essere in formato analogico (ad esempio un segnale televisivo PAL) oppure digitale (ad esempio MPEG).

Successivamente si adatta il formato dell'immagine a quello ottimale per il sistema di visualizzazione mediante microspecchi. Questo è intrinsecamente digitale, pertanto nel caso di segnale di tipo analogico si effettua la conversione analogico-digitale. La schiera di microspecchi è adatta a visualizzare immagini di tipo progressivo, quindi, nel caso in cui il segnale di ingresso sia interlacciato (i segnali televisivi, sia NTSC che PAL) si provvede alla conversione da interlacciato a progressivo. In tal modo si possono ridurre alcuni artefatti tipici delle immagini interlacciate (flicker di riga e di quadro, visibilità della struttura a righe). Il deinterlacciamento può essere effettuato utilizzando tecniche di varia complessità. Quelle più semplici (ripetizione di riga, media fra righe adiacenti, e in generale FIR intra-field) sono meno costose, poiché non richiedono memorie di quadro, ma presentano difetti quali flicker di riga e perdita di risoluzione. Le tecniche inter-field e inter-frame di tipo adattativo basate sulla rilevazione del movimento hanno prestazioni decisamente migliori a spese di una complessità via via crescente (fino a tre memorie di semiquadro e circa 90 kgates per la realizzazione dell'algoritmo). Nel caso di proiezione mediante DMD il pixel è quadrato, inoltre la schiera di microspecchi ha un numero di pixel per riga ed un numero di righe per quadro ben definito (figura 9). Per adattare i vari formati video d'ingresso vengono quindi applicate delle operazioni di ricampionamento e scalamento, orizzontale e verticale, mediante filtri FIR (finite impulse response). Occorre inoltre effettuare la conversione delle componenti di crominanza (da luminanza e differenze di colore agli appropriati valori RGB, rosso, verde e blu). Per compensare la caratteristica non lineare dei CRT, ai segnali video viene applicata, in fase di codifica, una precorrezione denominata gamma: poiché i DMD hanno invece una caratteristica di trasferimento segnale-luce lineare, occorre applicare una funzione di degamma.

Il miglioramento dell'immagine, cioè della qualità percepita, è attuata in gran parte sfruttando le risorse (in termini di memoria e di complessità circuitale) necessarie per le operazioni precedentemente descritte. La memoria di quadro necessaria per il deinterlacciamento e per lo scalamento, viene sfruttata per realizzare anche un filtro temporale per la riduzione del rumore di luminanza. E' applicato un algoritmo adattativo di espansione dei livelli nero/bianco in modo da migliorare la percezione soggettiva del contrasto: la dinamica dei neri (bassi livelli dei segnali) è estesa

Fig. 9 - Sono stati realizzati differenti formati di DMD: SVGA (848x600; 508 800 specchi), XGA (1024x768, 786 432 specchi), SXGA (1280x1024, 1 310 720 specchi)

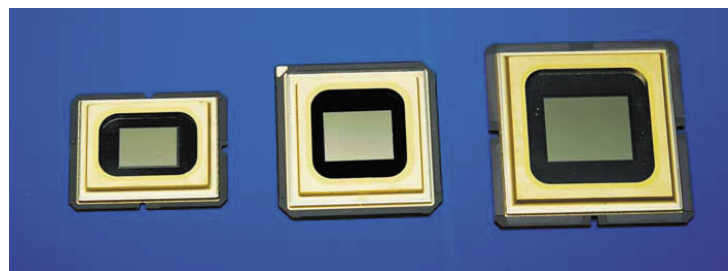
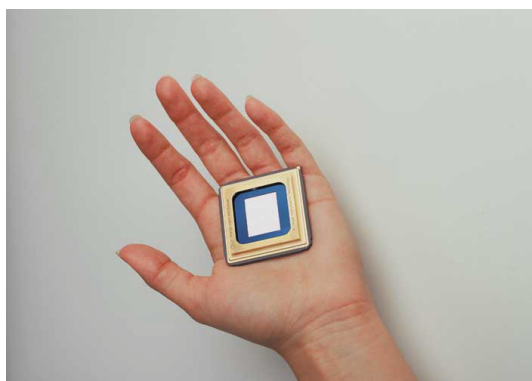



Fig. 10 - Comparazione fra le dimensioni di una mano umana e quelle del dispositivo SXGA: 1280x1024; 1,310,720 specchi.

verso il basso, ma solo nel caso in cui la scena presenti una dinamica complessiva sufficientemente estesa, al fine di evitare una saturazione al nero nel caso di scene particolarmente scure. Analoga operazione può essere applicata per estendere la dinamica dei bianchi. Ulteriori miglioramenti della qualità percepita sono attuati per quanto riguarda il dettaglio di luminanza (per il video e per la grafica), e le transizioni di crominanza (si riducono i difetti dovuti alla limitazione in banda delle componenti di crominanza del segnale video codificato PAL, NTSC o MPEG).

La riduzione degli artefatti ha lo scopo di ridurre al disotto della soglia di visibilità la percettibilità dei difetti tipici dei sistemi di visualizzazzione digitali (quali il DMD). L'aggiunta di rumore bianco (dithering) riduce la comparsa di contorni spaziali dovuti all'operazione di degamma. Sempre operazioni di dithering, selettive spazio/temporali, evitano la percezione di contorni temporali dovuti all'uso della PWM per modulare la luce e ottenere la scala dei grigi: i movimenti dell'occhio o la temporanea ostruzione dell'immagine dalla vista possono essere la causa della comparsa di questi artefatti.

Infine vengono attuate le operazioni di formattazione per generare i segnali PWM, di generazione di informazioni di sfondo, nel caso in cui l'immagine non riempia l'intera area visualizzabile, memorizzazione delle opportune informazioni per la generazione delle immagini nella memoria di buffer e in quella DMD, supporto dei diversi formati di proiezione, frontale e a retroproiezione.

Il sistema DLP, di cui DMD (figura 10) è il cuore, è un sistema complesso, in cui funzioni e algoritmi sono integrati in ASIC (Application Specific Integrated Circuit) sviluppati per soddisfare al meglio i requisiti di qualità richiesti per la visualizzazione di immagini nei diversi campi di applicazione.

6. Il mercato

La gamma di sistemi di proiezione è estremamente ampia e numerosi sono i fornitori, benché tutti gli apparati siano basati su sottosistemi DLP prodotti da una sola industria. I prodotti si differenziano in termini di luminosità e contrasto, di peso e ingombro, di prezzo. Le caratteristiche tecniche e di affidabilità stanno rapidamente migliorando. Sono stati recentemente introdotti modelli da 2500 lumen (ad un costo di circa 4500 € e con un peso poco superiore ai 4 kg) e annunciati prodotti di peso inferiore a 1 kg (2,2 libre, 1000 lumen, rapporto di contrasto 1800:1). Sempre a titolo di esempio, da settembre sarà disponibile un proiettore, basato su singolo DMD, che presenta le migliori caratteristiche in termini di risoluzione (nativa SXGA, 1280 x 1024 pixel), luminosità (3000 lumen), e rumorosità (28 dB), con un peso di 3 kg.

L'obiettivo indicato dall'industria per quanto riguarda i prezzi è di produrre in un futuro prossimo proiettori per applicazioni business a circa 1000 € (attualmente il prezzo minimo è circa il doppio, ma normalmente i prezzi superano i 3000 €).

Un elemento importante, per valutare il costo

di manutenzione del proiettore, è la vita della lampada, che indica il momento in cui la luminosità è dimezzata rispetto a quello che caratterizza la lampada nuova Nota 1

Nel campo dei retroproiettori, di particolare interesse per l'*home theatre* e quindi per riproduzione televisiva, recentemente è stato presentato un modello da 43", dal peso di 36 kg, con un ingombro in profondità di 40 cm ad un prezzo inferiore ai 4000 $, un terzo del costo dei primi retroproiettori basati su questa tecnologia. Il modello da 50" avrà un prezzo di circa 4500 $. Utilizzano il DMD con una risoluzione nativa da 1280 x 720 pixel, formato 16:9, accettano in ingresso segnali televisivi analogici e digitali, anche in formato HDTV.

L'obiettivo dell'industria è quello di produrre retroproiettori da 50" con un peso di 25 kg ed una profondità di circa 30 cm. Per quanto riguarda il prezzo, l'obiettivo indicato è quello di scendere fino a 1500 $.

Le informazioni contenute in questa scheda sono principalmente ricavate dal sito web www.dlp.com. Tale sito è estremamente ricco di informazioni sia commerciali che tecniche. Le foto e i disegni che illustrano questa scheda sono disponibili su tale sito.

Nota 1
Attualmente la maggior parte dei proiettori utilizzano le lampade UHP™ (*Ultra High Performance*) inventate dalla Philips. Esse si basano su un arco in vapore di mercurio puro ad alta pressione. L'arco può essere da 1,3 a 1,0 mm e crea una sorgente luminosa molto piccola, con una elevata efficienza (una UHP da 100 W può fornire una quantità di luce sullo schermo superiore a quella fornita da una lampada metal halide da 250 W).
Esistono lampade per proiettori da 120 W fino a 250 W; per i retroproiettori da 100 e 120 W.
La vita delle lampade per proiettori arriva a 2000 ore, per i retroproiettori a 10000 ore (si prevede che potrà essere estesa in futuro fino a 20000 ore).
Indicativamente, il costo di lampade UHP è superiore ai 300 €.

Che cosa è, come funziona:
OLED, una tecnologia emergente per i display

ricerca bibliografica e testo:
ing. Marzio **Barbero** e
ing. Natasha **Shpuza**

grafica 3D: ing. Mario **Muratori**

1. Premessa

OLED (*Organic Light Emitting Diode*) è un modo nuovo di generare luce, utilizzando materiali organici invece della complessa struttura cristallina su cui si basano i tradizionali LED (*Light Emitting Diode*)

Recentemente sono stati realizzati prototipi di display anche di ampie dimensioni che dimostrano che questa tecnologia ha il potenziale per essere impiegata anche per schermi ad uso informatico e televisivo.

2. Cenni storici

Nel 1936 Destriau notò la creazione di luce quando veniva applicato un campo elettrico AC ad un sale inorganico di zinco, nel 1950 fu osservato da Bernanose un effetto simile nel caso di film di materiali organici.

Negli anni '80 Ching Tand e Stephen Van Slyke alla Eastman Kodak Company (che detiene un elevato numero di brevetti sulla tecnologia di base e sui materiali) ottennero una più elevata efficienza luminosa applicando un campo elettrico DC a strati estremamente fini di un composto dell'alluminio (ALq). Nel 1998 sono stati proposti i primi prodotti a colori. I dispositivi furono denominati OLED perché sono attivati, come i LED (che però sono dispositivi discreti di dimensioni dell'ordine del millimetro), utilizzando una tensione continua e sono caratterizzati da una elevata efficienza luminosa.

A differenza del lungo percorso di sviluppo che ha caratterizzato la tecnologia LCD, questa sembra presentare uno sviluppo incredibilmente rapido e sono in arrivo i primi display full color, a matrice attiva.

3. Principio di funzionamento degli OLED

La struttura convenzionale di una cella OLED consiste di una pila di strati di materiale organico compresi fra un anodo, trasparente, e un catodo metallico (oppure nella struttura con emissione superiore, da un catodo semitrasparente e un anodo metallico).

Gli strati organici sono uno strato per l'iniezione delle lacune, uno strato per il trasporto delle lacune, uno strato emettitore e uno strato di trasporto degli elettroni (figura 1). Quando è applicata una tensione (alcuni volt) alla cella, le cariche iniettate, positive e negative, si ricombinano e si produce luce (elettroluminescenza). La struttura degli strati organici e di anodo e catodo è progettata al fine di massimizzare il processo di ricombinazione nello strato di emissione e, in definitiva, il flusso luminoso in uscita.

Con una opportuna scelta dei materiali costituenti i vari strati, l'intera struttura può avere lo spessore di un decimo di mm.

Le molecole OLED di piccole dimensioni sono prodotte in camere sotto vuoto e sono ampiamente disponibili, prodotte dalle industrie

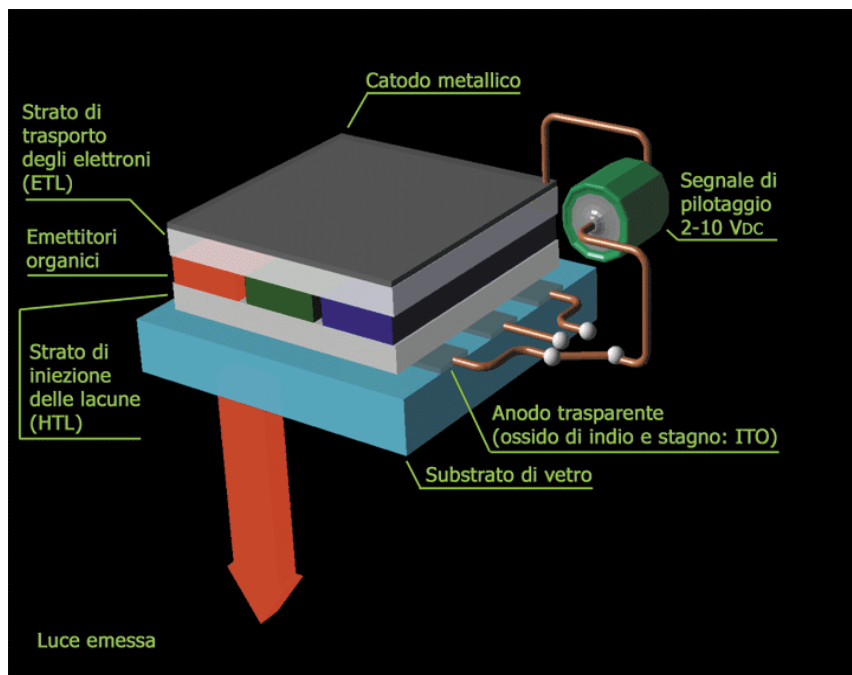



Fig. 1 - Schema della struttura OLED

dei semiconduttori. Nel caso dei Poly-OLED, il materiale organico è un polimero speciale, di semplice applicazione al substrato e quindi il processo di produzione può divenire economico, per produzioni in grandi volumi.

Sono stati sviluppati materiali per l'emissione di verde e blu, adatti ad usi pratici, ma è tuttora in atto l'attività di sviluppo di un materiale emittente che sia in grado di produrre un rosso di efficienza luminosa elevata e sufficiente purezza di colore.

Analogamente agli LCD, esistono display OLED a matrice passiva e a matrice attiva (spesso indicati anche come AMOLED, Active Matrix OLED).

Nei display a matrice passiva, un sottile strato di polimero è applicato ad un substrato, tipicamente vetro coperto da una struttura di linee, l'anodo, ottenute a partire da uno strato conduttore depositato sul vetro. Un'altra struttura è il catodo, le cui linee sono applicate in direzione perpendicolare a quelle dell'anodo. Per l'attivazione, una tensione opportuna viene applicata ad una linea anodica e sono quindi attivate in sequenza tutte le linee catodiche. Poi viene attivata la linea anodica successiva, e nuovamente tutte quelle catodiche. Si attua quindi una scansione riga dopo riga.

Nel caso di matrice attiva, una struttura di transistor attivi è integrata sul substrato del display, almeno due transistor per ciascun pixel. Questi transistor sono connessi in sequenza alle linee perpendicolari anodiche e catodiche e sono in grado di "mantenere" attivo ciascun pixel fino al periodo di scansione successivo. I display OLED a matrice attiva sono più complessi e quindi più costosi, ma offrono immagini più luminose e definite che quelli di tipo passivo.

Vantaggi specifici di OLED, rispetto alle tecnologie trasmissive come LCD, sono legati al fatto che si basa sull'elettroluminescenza, cioè all'emissione diretta della luce: l'angolo di visione è ampio, il consumo di energia è basso, non è necessaria la sorgente di luce sul retro del display (con vantaggi per lo spessore totale del display e soprattutto dal punto di vista dell'inquinamento ambientale, poiché le lampade contengono mercurio).

D'altro canto occorrono ulteriori progressi per quanto riguarda il decadimento dei colori e la

Fig. 2 - Prototipo di display OLED da 13” (SVGA 800 x 600, 1,4 mm di spessore, luminanza 300 cd/m^2, contrasto 500:1) presentato dalla SONY al CEATEC nell’ottobre 2001.

vita del display e i vantaggi di basso consumo energetico sono sensibili soprattutto nel caso di schermi che devono essere retroilluminati con continuità (ad esempio per i notebook), mentre possono essere meno importanti nel caso dei telefoni cellulari.

4. Il mercato

Il mercato dei display piatti a LCD sta ampliandosi rapidamente e tale crescita facilita la possibilità di crescita anche dei dispositivi OLED, che si indirizzano allo stesso tipo di mercato. La tecnologia OLED è promettente in quanto può in teoria fornire caratteristiche superiori rispetto agli LCD: spessore e peso ridottissimi, ampio angolo di visione ed elevata velocità di risposta. Sono quindi particolarmente adatti come display per applicazioni quali: telefoni mobili, autoradio, sistemi di navigazione, PDA (*Personal Digital Assistant*), telecamere e macchine fotografiche digitali, giochi. OLED a matrice passiva sono già diffusi per alcune di queste applicazioni. La velocità di penetrazione sul mercato dei display OLED dipende dal costo e dal differenziale di costo rispetto agli LCD.

E’ stata dimostrata la possibilità di realizzare OLED a matrice attiva di ampie dimensioni, adatte per applicazioni quali notebook, monitor e TV. In figura 2 è riprodotto un prototipo di 13” della Sony e la Toshiba ha dimostrato nel maggio di quest’anno (al SID, Society for Information Display, a Boston) un prototipo per illustrare la fattibilità di display da 17” (1280 x 768 pixel, 64 livelli di grigio, 256 k colori, luminanza 300 cd/m2, contrasto 200:1). Vi sono previsioni che indicano che OLED di dimensioni adatte per notebook e TV compariranno sul mercato entro il 2006.

Riferimenti bibliografici

Sono reperibili informazioni sulla tecnologia OLED e sui primi prodotti sviluppati sul sito della Kodak (www.kodak.com) e su quello della DuPont (www.dupont.com). Informazioni sulla tecnologia e sulle previsioni di sviluppo del mercato sono disponibili sul bollettino FPD Update della SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International), disponibile anche su web (www.semi.org).